

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkatuotanto

2010

Juha-Pekka Tupala

# STANDARDIIN POHJAUTUVA SÄHKÖVERKON LAADUN MITTAAMINEN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Elektroniikkatuotanto

Opinnäytetyön valmistumisajankohta: Kesäkuu 2010 | Sivumäärä: 35

Yngvar Wikström, Ins (YAMK)

Juha-Pekka Tupala

# STANDARDIIN POHJAUTUVA SÄHKÖVERKON LAADUN MITTAAMINEN

Opinnäytetyön tavoitteena oli määritellä erään elintarviketehtaan sähköverkon tila sen tärkeimpien sekä eniten kuormitettujen pääkeskusten osalta ja saada samalla käsitys tehtaan verkon sähkön laadusta. Tärkeimpiä tutkittavia laadun osatekijöitä olivat jännitepiikit, jännitetasen nousut ja välkyntä, koska juuri näiden epäiltiin aiheuttavan laiterikkoja tehtaassa.

Työ tehtiin mittaamalla mittausjakso kerrallaan kunkin pääkeskuksen jännite- ja virta-arvoja. Mittausjakson päätyttyä tulokset kerättiin taulukkoon ja tuloksien perusteella piirrettiin tarvittavat kuvaajat sekä tehtiin tarvittavat laskelmat. Saatuja tuloksia verrattiin standardin määrittelemiін raja-arvoihin ja näiden tuloksien perusteella tehtiin päätökset mahdollisista jatkotoimenpiteistä.

Työstä saaduilla tuloksilla pystytään poissulkemaan jännitepiikkien ja jännitetasen nousujen osuus aikaisemmin tapahtuneista tuotannon sekä kunnossapidon laiterikoista. Väлкynnän osalta opinnäytetyöstä saadut mittaus tulokset taas vahvistivat jo aiemmin ollutta käsitystä. Tietyissä osin tehtaan sähköverkkoa välkyntä oli erittäin voimakasta ja se ylitti useaan otteeseen standardissa määritellyt raja-arvot.

Saavutettujen tuloksien pohjalta voidaan jatkaa väлкynnän todellisen vian aiheuttajan paikallistamista, näin voidaan samalla myös parantaa tehtaan sähköverkon toimintaa päivittäisessä käytössä. Lisäksi opinnäytetyöstä saatuja tuloksia pystytään käyttämään tulevaisuudessa apuna tehtäessä vertailua uusien sekä vanhojen sähköverkon laatumittausten välillä.

ASIASANAT:

sähköverkko, laatumittaus, standardi, välkyntä

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics Production

June 2010 | Total number of pages: 35

Yngvar Wikström, M.Eng

Juha-Pekka Tupala

## A STANDARD-BASED QUALITY MEASUREMENT OF AN ELECTRICAL NETWORK

The aim of this thesis was to define the status of the electrical network of a certain frozen food factory, in terms of its most important and also most loaded main distribution boards, and also to get a picture of the power quality in the factory network. The most important quality aspects to be examined were rapid voltage change, voltage variations and flicker.

The thesis was done by measuring the voltage and current values of each main distribution board one measurement period at a time. At the end of the measurement period all results were collected in table format and after that all necessary diagrams were drawn and all necessary calculations were made. The results were compared to the limit values defined by the standard and possible further actions were taken based on these results.

The results of this thesis show that the peak voltage and voltage level rises in the past production and maintenance hardware failures can be excluded. Measurement results in the thesis confirm the earlier impression of the flicker. In certain parts of the factory network flicker was very strong and it exceeded the limit values defined by the standard several times.

Locating the actual fault of flicker can be continued on the basis of the achieved results, and in this way also the functioning of the network can be improved in daily use. In addition, the results of the thesis can be utilized in future when making a comparison between new and old quality measurements of the electrical network.

### KEYWORDS:

standard, electrical network, quality measurement, flicker

# SISÄLTÖ

## LYHENTEET

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 LÄHTÖKOHDAT</b>	<b>2</b>
2.1 Ylijännitepiikit ja jännitetasojen nousu	2
2.2 Nopeista jännitemuutoksista aiheutuva välkyntä	2
<b>3 SÄHKÖN LAATU</b>	<b>4</b>
3.1 Sähkön laatutekijät	4
3.1.1 Sähköverkon toimintavarmuus	4
3.1.2 Jakelujännitteen laatu	5
3.2 Sähkönlaadun arviointi ja standardit	5
3.2.1 Verkkotaajuus	6
3.2.2 Jakelujännitteen suuruus ja jännitevaihtelu	7
3.2.3 Nopeat jännitemuutokset ja välkyntä	7
3.2.4 Jännitekuopat	8
3.2.5 Jännitesärö ja harmoniset yliaaltojännitteet	9
3.2.6 Transienttiylijännitteet	10
3.2.7 Jakelujännitteen epäsymmetria	11
3.2.8 Jännitteen tasakomponentti	11
<b>4 MITTAUKSET</b>	<b>12</b>
4.1 Mittalaite	12
4.2 Tietojen tallennus sekä raportointi	13
4.3 Asennus	14
<b>5 SÄHKÖVERKON LAATUMITTAUKSEN TULOKSET</b>	<b>16</b>
5.1 Pääkeskus LF1	16
5.1.1 Taajuus	16
5.1.2 Jänniteen suuruus	17
5.1.3 Välkyntä	18
5.1.4 Jännitesärön aikavaihtelu	20
5.1.5 Vaihevirrat	21
5.2 Pääkeskus S1	22

5.2.1 Taajuus	22
5.2.2 Jännitteen suuruus	23
5.2.3 Välkyntä	24
5.2.4 Jännitesärön aikavaihtelu	26
5.2.5 Vaihevirrat	27
5.3 Pääkeskus S2	28
5.3.1 Taajuus	28
5.3.2 Jännitteen suuruus	29
5.3.3 Välkyntä	30
5.3.4 Jännitesärön aikavaihtelu	32
5.3.5 Vaihevirrat	33
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>34</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>35</b>
<b>LIITTEET</b>	

Liite 1: Harmonisten yliaaltojen enimmäisarvot järjestyslukuun 25 saakka

Liite 2: Piirikaavio pääkeskus LF1:den mittausriviliittimistä

Liite 3: Piirikaavio pääkeskus S2:den mittausriviliittimistä

Liite 4: Piirikaavio pääkeskus S1:den mittausriviliittimistä

Liite 5: Esimerkki mittautuloksista saadusta tuloslistauksesta

## Lyhenteet

ANSI	Yhdysvaltain kansallinen standardi-instituutti
CENELEC	Eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö
IEEE	Kansainvälinen tekniikan alan järjestö
Plt	Välkynnän pitkäaikainen häiritsevyysindeksi
Plt,max	Välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysineksin suurin arvo
Pst	Välkynnän lyhytaikainen häiritsevyysindeksi
Pst,3max	Välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin kolmanneksi suurin arvo
RMS	Tehollisarvo
SENER	Sähköenergialiitto Ry
THD	Harmoninen kokonaissärökerroin
$U_1$	Perustaajuuden jännite
$U_h$	Suhteellinen amplitudi

# 1 JOHDANTO

Olennaisena osana elintarvikkeiden turvalliseen tuotantoon kuuluu sähköverkon varma ja virheetön toiminta ympäri vuorokauden vuoden jokaisena päivänä. Sähköverkon puutteellinen toiminta vaarantaa sekä tuotannon pakkauslaitteiden, että pakkasvarastojen jäähdytyslaitteiden jatkuvan toiminnan.

Apetit Pakaste Oy:n tehtaalla, joka toimi työn tilaajana, oli jo aiemmin ulkoisen yrityksen toimesta toteutettu yhden pääkeskuksen sähkön laadun mittaukset, koska keskuksen taajuusmuuttajat olivat toistuvasti antaneet ylijännitehälytyksiä. Tuolloin mitattiin viikon ajan keskuksen jännitteitä, jotta saatiin tarvittava varmuus sen hetkisistä jännitetasoista ja tämän myötä tarvittavat tiedot päätöksentekoa sekä jatkotoimenpiteitä varten. Mittaustulokset eivät kuitenkaan tuolloin antaneet aihetta erityisiin jatkotoimenpiteisiin. [1]

Opinnäytetyön mittaukset toteutettiin yhdessä Paneliankosken voima Oy:n kanssa, josta myös oli vuokralla mittalaite, jolla kyettiin suorittamaan tarvittavat mittaukset. Mittausten tarkoituksena oli selvittää sähköverkon tila, havaita mahdolliset häiriöt ja tämän myötä ryhtyä tarvittaviin jatkotoimenpiteisiin tuotannolle oleellisten ja tärkeiden laitteiden toiminnan turvaamiseksi. Erityisesti mittauksissa kiinnitettiin huomiota jännitepiikkeihin, hetkellisiin jännitetason nousuihin sekä välkyntään.

Kaikki mittaukset suoritettiin standardien vaatimalla tavalla, jotta tuloksien vertailu sekä jatkotoimenpiteistä tehtävät päätökset olisivat yhdenmukaisia ja selkeitä. Opinnäytetyön mittaukset tehdään niin, että niitä pystytään myös jatkossa käyttämään vertailukohtana sähköverkon laadun ja kuormituksen suhteen tehtävissä päätöksissä, kuten esimerkiksi uutta tuotantolinjaa suunniteltaessa.

## 2 LÄHTÖKOHDAT

Lähtökohtana tehtäville mittauksille oli kolme erilaista sähköverkossa esiintyvää häiriötä, ylijännitepiikit, jännitetasen nousut ja välkyntä. Mittauksilla oli tarkoitus selvittää syyt näihin häiriöihin ja lisäksi paikantaa muita sähköverkossa esiintyviä häiriöitä.

### 2.1 Ylijännitepiikit ja jännitetasojen nousu

Ylijännitepiikkien ja jännitetasojen nousujen tutkimiseen päädyttiin, kun osassa tuotannon laitteissa oli tuhoutunut ylijännitesuojia lyhyellä aikavälillä. Tuhoutuneet ylijännitesuojat olivat varistorimallisia, suoraan laitteen piirilevyille kiinteästi asennettavia ylijännitesuojia. Varistori on puolijohde ja sillä on taipumus vanheta. Varistorin vanhenemista silmällä pitäen olikin muistettava, että varistorien tuhoutuminen ei välttämättä johtunut isoista ylijännitepiikeistä tai jännitetasojen nousuista, vaan kyse on voinut olla pitkällä aikavälillä tapahtuvista hyvin pienistä jännitetasojen nousuista ja jännitepiikeistä. Nämä tekijät lyhentävät omalta osaltaan varistorin käyttöikää jo huomattavan paljon.

Toinen ylijännitepiikkien ja jännitetasojen nousujen tutkimiseen johtava tekijä oli tuotannon, sekä kunnossapidon tiloissa tuhoutuneet monitorit. Asiassa huomioitavaa oli kuitenkin se, että suurin osa tuhoutuneista monitoreista oli saman valmistajan samasta mallisarjasta, joten kyseessä on voinut olla jonkinlainen tyyppivika tai valmistusvirhe.

### 2.2 Nopeista jännitemuutoksista aiheutuva välkyntä

Tehtaan sähköverkossa tapahtuva välkyntä oli jo pitkään ollut havaittavissa lähinnä valaistuksen kautta tapahtuvassa luminanssivaihtelussa. Väлкynnän häiritsevyys ei silmämääräisesti ollut kovinkaan suurta, mutta oli kuitenkin niin selkeästi havaittavissa, että asiaa haluttiin tutkia tarkemmin. Tutkimisen tärkeysarvoa korosti vielä se, että väлкynnän aiheuttamat ongelmat eivät rajoitu pelkästään näköaistimukseen vaan se voi aiheuttaa häiriötä myös oikosulkumoottoreihin, joita tehtaassa on käytössä huomattavan paljon.

Nopeista jännitemuutoksista johtuva välkyntä aiheutuu yleensä suurien kuormien samanaikaisesta kytkeytymisestä verkkoon. Kyseisessä tapauksessa pääepäily



kohdistui kompressoriasemalla sijaitsevien kompressorien suuriin sähkömoottoreihin ja niiden samanaikaiseen kytkeytymiseen.

### 3 SÄHKÖN LAATU

Sähkön hyvä laatu tuo yrityksille ja yksityisille kuluttajille turvallisuutta, luotettavuutta ja kaiken lisäksi taloudellisuutta. Yrityksille laadukkaan sähkön saaminen on tärkeä tekijä jo pelkän toimivan tuotantoprosessin kannalta, koska pienikin katko sähköverkossa saattaa aiheuttaa suuren katkoksen yrityksen tuotantoprosessissa ja tätä kautta yrityksen koosta riippuen tuotantotappiot voivat olla hyvin suuria. [2, 3]

Yleisesti ottaen voidaan yksinkertaistaa, että kuluttaja katsoo saavansa laadukasta sähköä kun sähköä käyttävät laitteet toimivat varmasti ja virheettömästi.

#### 3.1 Sähkön laatutekijät

Sähkön laatutekijät tai niin kutsutut laadun mittarit koostuvat pääosin sähköverkon toimintavarmuudesta, jakelujännitteen laadusta sekä muutamista jakelukohtaisista tunnusluvuista, joita tässä työssä ei kuitenkaan tarkemmin käsitellä. [2]

##### 3.1.1 Sähköverkon toimintavarmuus

Sähkönkäyttäjän kannalta sähköverkon toimintavarmuus on yksi tärkeimmistä sähkön laatutekijöistä. Pitää kuitenkin muistaa, että mikään sähköverkko ei ole täysin toimintavarma ja tästä syystä sähkönjakeluun tulee keskeytyksiä ennemmin tai myöhemmin. [2]

Sähkönjakelun keskeytys on tilanne, jossa liittymiskohdan jännite on alle 1 %:n syötettävän jännitteen nimellisarvosta. Liittymiskohdaksi katsotaan kohta jossa sähkönkäyttäjän oma sähköverkko liittyy yleiseen jakeluverkkoon. Sähkönjakelun keskeytykset jaetaan karkeasti kahteen eri ryhmään: ennalta sähkönkäyttäjälle ilmoitettuihin työkeskeytyksiin ja häiriökeskeytyksiin, jotka yleensä johtuvat verkon ulkopuolisista tekijöistä, laitevioista tai -häiriöistä. Pitkäkestoisen häiriökeskeytyksen aiheuttaa yleensä jonkin sähköjakeluun oleellisesti vaikuttavan komponentin rikkoutuminen tai vikaantuminen. Lyhyen häiriökeskeytyksen aiheuttaja on usein ohimenevä vika, joka korjaantuu pelkällä sähköverkon uudelleenkytkennällä. [2]

### 3.1.2 Jakelujännitteen laatu

Jakelujännitteen laatu on yleisin laadunmittari, kun tarkastellaan sähkön laatua. Jakelujännitteen laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat [4]

- taajuus
- jännitteen suuruus
- nopeat jännitemuutokset
- jännitteen symmetria
- jännitteen säröytyminen ja harmoniset yliaaltojännitteet
- jännitekuopat
- transientit.

### 3.2 Sähkönlaadun arviointi ja standardit

Sähköenergia on tuote, jolla on tarkat laatuvaatimukset. Sähköverkossa jaettavan sähköenergian on täytettävä kansalliset laatuvaatimukset eli standardit. Suomessa, kuten pääosin muissakin Euroopan maissa, sähkönlaatu määritetään suurimmaksi osaksi jännitteestä ja laatumääritelmät pohjautuvat pitkälti EN 50160-standardiin ja sen eri sovelluksiin. Standardin määrittämän laadun lisäksi Suomessa SENER (Sähköenergialiitto ry) määrittää standardin täyttävän sähköenergian laadun joko korkeaksi tai normaaliksi. [2, 4, 5]

Laatuhäiriöiden poistamiseksi ja niiden paikallistamiseksi on myös sähkövirran laatuun kiinnitettävä huomiota, kuten ANSI (American National Standards Institute)- ja IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) -standardit jo tekevät. [2, 6]

Eurooppalaisen standardisoimisjärjestön CENELECin (European Committee For Electrotechnical Standardization) hyväksymä EN50160-standardi antaa pääjännitteestä, sähkönkäyttäjän liittymiskohdasta mitatuille arvoille rajat ja hyväksytyt vaihteluvälit yleisissä pien- ja keskijännitteisissä sähkönjakeluverkoissa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Tässä asiansyhteydessä pienjännitteellä tarkoitetaan pienjännitesähköverkosta jaettavaa jännitettä, jonka vaiheesta vaiheeseen mitattu RMS (Root mean square) -arvo ei ylitä 1 000 V:a. Vastaavasti keskijännitteellä tarkoitetaan keskijännitesähköverkossa jaettavaa jännitettä, jonka vaiheesta vaiheeseen mitattu RMS-arvo on suurempi tai yhtä suuri kuin 1 kV, mutta pienempi tai yhtä suuri kuin 35 kV. [5, 6]

Standardissa on tiettyjä rajoituksia, joissa sitä ei sovelleta epänormaaleiden käyttöolosuhteiden vuoksi: vian jälkeiset käytöt ja tilapäiset jännitesyötöt, tilanteet joissa viat johtuvat asiakaan asennuksista tai asiakkaan laitteistoista jotka eivät täytä voimassa olevia teknisiä vaatimuksia tai standardeja, sekä tilanteet joissa sähköä tuottavat laitteet eivät täytä voimassa olevia teknisiä vaatimuksia tai standardeja. Rajoituksia on myös epätavallisissa tilanteissa, jotka eivät johdu sähköntoimittajasta:

- poikkeukselliset sääolosuhteet ja muut luonnonkatastrofit
- kolmannen osapuolen aiheuttamat häiriöt
- lain sallimat työtaistelut
- viranomaisten toimet
- ulkopuolisista tapahtumista johtuva tehopula. [5, 6]

Standardissa esitetyt raja-arvot on määritelty siten, että suureiden tulee pysyä ennalta määritellyn osuuden ajasta tietyissä rajoissa, eli esimerkiksi arvon tulee pysyä  $\pm 3 \%$ :n sisällä annetusta arvosta 95 % päivästä/viikosta/vuodesta 10 min. mittausarvoista laskettuna. Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin standardissa kullekin pääjännitteestä mitatulle suurelle annettuihin laatuvaatimuksiin. Standardin määrittelemien laatuvaatimusten lisäksi on selvitetty myös SENER:n määritelmät tietyille jännitteen ominaisuuksille niin normaalille kuin korkeallekin sähköenergian laadulle. [4, 5, 6]

### 3.2.1 Verkkotaajuus

Sähköverkon perustaajuudella tarkoitetaan sitä taajuutta jolla jakelujännite siirretään voimalaitokselta sähkönkuluttajalle. Suomessa ja muualla Euroopassa sähköverkon nimellistaajuus on 50 Hz. [2, 5]

EN 50160-standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa perustaajuuden keskiarvo mitattuna 10 s:n aikaväliltä tulee olla 50 Hz  $\pm 1 \%$  (49,5 – 50,5 Hz) 99,5 % vuodesta ja 50 Hz + 4 / – 6 % (47 – 52 Hz) 100 % vuodesta. Saareke- ja varavoimakäytössä taajuuden tulee olla 50 Hz  $\pm 2 \%$  (49 – 51 Hz) 95 % vuodesta ja 50 Hz  $\pm 15 \%$  (42,5 – 57,5 Hz) 100 % vuodesta. Kaikki annetut määräykset koskevat sekä pien-, että keskijännitteitä. [2, 5, 6]

SENER:n ohjeiden mukaan verkkotaajuus täyttää korkean laadun kriteerit kun sen arvo on 100 % ajasta  $50 \text{ Hz} \pm 0,5 \%$  (49,75 – 50,25 Hz) ja normaalin laadun se täyttää kun arvo on 100 % ajasta  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$  (49,5 – 50,5 Hz). [4, 5]

### 3.2.2 Jakelujännitteen suuruus ja jännitevaihtelu

Jakelujännitteen suuruudella tarkoitetaan liittymiskohdasta tietyllä aikavälillä mitattua jännitteen tehollisarvoa. Jakelujännite on yleensä myös käytettävän järjestelmän nimellisjännite ja pienjännitteellä sen suuruus on vaihe- ja nollajohtimen väliltä mitattuna 230 V. Keskijännitteellä jakelujännitteen suuruus on sopimuksen mukainen eli keskijännitteellä jakelujännitteen suuruutta ei ole ennalta määriteltä. [4, 5]

Normaaleissa käyttöolosuhteissa pienjännitteisen jakelujännitteen tehollisarvojen 10 min. keskiarvojen tulee olla  $230 \text{ V} \pm 10 \%$  (207 – 253 V) 95 % ajasta ja  $230 \text{ V} + 10 / - 15 \%$  (195,5 – 253 V) 100 % ajasta. Annetut prosentuaaliset raja-arvot koskevat myös keskijännitteitä. [4, 5, 6, 7]

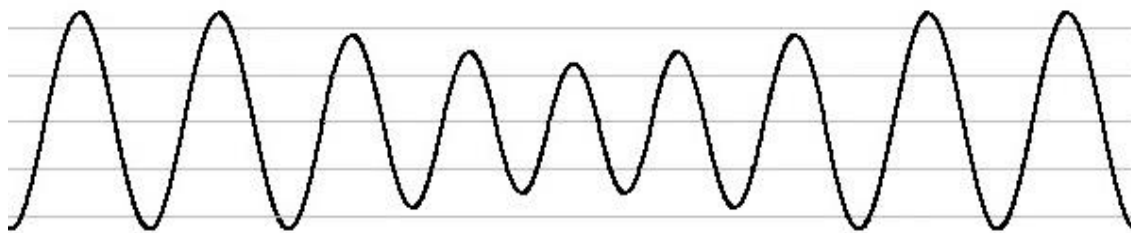
SENER:n korkean laadun määritelmän täyttääkseen pienjänniteverkon jakelujännitteen 10 min. tehollisarvojen keskiarvojen tulee olla  $230 \text{ V} \pm 10 \text{ V}$  (220 – 240 V) 100 % ajasta ja normaalin laadun määritelmän täyttääkseen arvojen tulee olla 100 % ajasta  $230 \text{ V} + 6 / - 10 \%$  (207 – 244 V). [5, 8]

### 3.2.3 Nopeat jännitemuutokset ja välkyntä

Sähköverkossa tapahtuvat nopeat jännitemuutokset johtuvat yleensä sähkönkäyttäjän verkossa tapahtuvista kuormitusmuutoksista ja kytkennöistä. Nopealla jännitteenmuutoksella tarkoitetaan tilannetta jossa jännitteen tehollisarvo muuttuu nopeasti tasolta toiselle.

Normaaleissa olosuhteissa pienjännitteellä tapahtuva nopea jännitteenmuutos ei yleensä ylitä jännitteen nimellisarvoa yli  $\pm 5 \%$ :lla, mutta lyhytaikainen muutos voi tapahtua muutamia kertoja päivässä ja se voi olla  $\pm 10 \%$  nimellisjännitteestä. Keskijännitteellä nopea jännitteen vaihtelu ei yleensä ylitä jännitteen nimellisarvoa  $\pm 4 \%$ :lla, mutta lyhytaikainen muutos taas voi tapahtua useamman kerran päivässä ja voi olla  $\pm 6 \%$  nimellisjännitteestä. [2, 4, 5, 6, 7]

Nopeat jännitemuutokset aiheuttavat välkyntää (Kuva 3.1), joka tarkoittaa silmillä havaittavaa valon voimakkuuden vaihtelua eri valonlähteissä.



**Kuva 3.1** Jakelujännitteessä esiintyvä välkyntä.

Välkyntä häiritsevyyttä mitataan Plt-arvolla eli pitkäaikaisella häiritsevyyssindeksillä, sekä Pst-arvolla, joka tarkoittaa lyhytaikaista häiritsevyyssindeksiä. Plt-arvot on laskettavissa alla olevasta kaavasta (1) Pst-arvojen avulla.

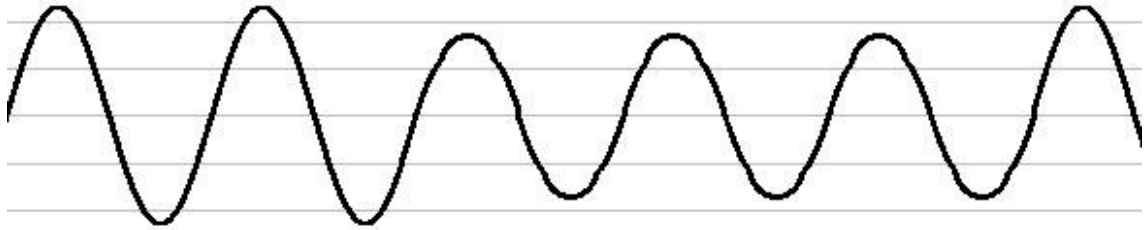
$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{Psti^3}{12}} \quad (1)$$

Normaaleissa käyttöolosuhteissa välkyntä pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksi tulisi olla 95 % viikosta pienempi tai yhtä suuri kuin yksi. [2, 5, 7, 9]

SENER:n korkean laadun täyttääkseen lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksin kolmanneksi suurin arvo (Pst,3max) tulisi olla pienempi tai yhtä suuri kuin yksi, 100 % ajasta ja pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin suurimman arvon (Plt,max) tulisi olla pienempi tai yhtä suuri kuin 0,8, 100 % ajasta. Normaalin laadun täyttääkseen Plt,max tulisi olla pienempi tai yhtä suuri kuin yksi, 100 % ajasta. [4, 5]

### 3.2.4 Jännitekuopat

Jännitekuoppa (Kuva 3.2) eli jakelujännitteen äkillinen aleneminen 1 – 90 % välille jakelujännitteen nimellisarvosta. Jännitekuopat aiheutuvat yleisessä jakeluverkossa tapahtuvista vioista tai asiakkaan omista kytkennöistä johtuvista vioista. Jännitekuoppa voi kestää 10 millisekunnista yhteen minuuttiin, mutta suurin osa jännitekuopista on kestoltaan alle yhden sekunnin ja aleneminen alle 60 %. Pienjänniteverkossa kuormitusten kytkentöjen seurauksena tapahtuvien jännitekuoppien suurus voi olla 10 – 50 % ja keskijänniteverkoissa 10 – 15 %. [4, 5, 7]



**Kuva 3.2** Jakelujännitteessä sijaitseva jännitekuoppa.

### 3.2.5 Jännitesärö ja harmoniset yliaaltojännitteet

Harmonisella yliaaltojännitteellä (Kuva 3.3) tarkoitetaan sinimuotoista jännitettä, jonka taajuus on jakelujännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna. Harmonisia yliaaltojännitteitä syntyy muun muassa hakkuriteholähteistä, tasasuuntaajista, taajuusmuuttajista ja ylikuormitetuista muuntajista. Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa mittareiden kasvavaa virhenäyttämää, muuntajien ylikuormitusta ja lisäävät yleisesti sähköverkon häiriöitä. [2, 4, 5]



**Kuva 3.3** Harmonisen yliaallon vuoksi säröytynyt jännite.

Harmonisia yliaaltojännitteitä voidaan arvioida, joko yksin tai yhdessä muiden kanssa. Yksin arvioitaessa niiden suhteellista amplitudia ( $U_h$ ) verrataan perustaajuuden jännitteeseen ( $U_1$ ), missä  $h$ :lla tarkoitetaan harmonisen järjestelmän järjestyslukua. Yhdessä harmonisia yliaaltojännitteitä voidaan verrata alla olevan harmonisen kokonaissärökertoimen (THD) kaavan (2) avulla. [2, 4, 5]

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \quad (2)$$

Harmonisten yliaaltojännitteiden jokaisen yksittäisen 10 minuutin tehollisarvon keskiarvon tulee olla normaaleissa käyttöolosuhteissa 95 % viikosta pienempi tai yhtä suuri kuin standardissa annettu arvo (Liite 1). Lisäksi THD arvon tulee olla kaikkien

yliaaltojen osalta neljänteenkymmenenteen järjestyslukuun saakka pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. [2, 4, 5]

SENER:n korkea laatu saavutetaan kun THD on pienempi tai yhtä suuri kuin 3 % nimellisjännitteestä ja harmonisten yliaaltojännitteiden arvot ovat korkeintaan standardissa annettujen arvojen mukaisia (Liite 1) 100 % ajasta. Normaali laatu on saavutettu kun THD on pienempi tai yhtä suuri kuin 6 % nimellisjännitteestä ja harmonisten yliaaltojännitteiden arvot pysyvät standardissa annettujen arvojen alapuolella 100 % ajasta. [4, 5]

### 3.2.6 Transienttiylijännitteet

Transienttiylijännite termillä tarkoitetaan lyhyttä sähköverkossa tapahtuvaa ylijännitepiikkiä (Kuva 3.4).



**Kuva 3.4** Transienttiylijännite.

Transienttiylijännitteet jaetaan kolmeen eri ryhmään: pitkiin yli 100  $\mu$ s transientteihin, keskipitkiin alle 100  $\mu$ s transientteihin, sekä lyhyisiin transientteihin, jotka ovat pituudeltaan alle yhden mikrosekunnin. Pitkiä transienttiylijännitteitä aiheuttavat sulakkeen palamiset ja kompensointikondensaattorien kytkeytymiset. Keskipitkien transienttien aiheuttaja on tyypillisesti salama, joka iskee sähkölinjaan tai sen välittömään läheisyyteen. Sähköverkkoon lyhyitä transientteja aiheuttaa yleensä kuormien kytkeytyminen. Transientit ovat tyypillisesti pienjännitekäytössä satojen voltien luokkaa, mutta aiheuttajasta riippuen ne voivat olla jopa 6 kV tai sen yli. Transientit aiheuttavat ongelmia varsinkin jänniteherkille laitteille. Tällaisia laitteita ovat mm. tietokoneet ja tietoliikenneverkkolaitteet. [2, 4, 5]



### 3.2.7 Jakelujännitteen epäsymmetria

Jakelujännitteen epäsymmetrialla tarkoitetaan tilannetta jossa kolmen eri vaiheen välillä esiintyy merkittävää amplitudieroaa tai jännitteiden välisen vaihe-eron vääristymää. Yleisimmin epäsymmetrisen tilanteen verkossa aiheuttaa epätasaiset kuormat, mutta myös yhden vaiheen palanut sulake verkossa tai kompensointiparistossa voi aiheuttaa epäsymmetriaa. Verkon epäsymmetria aiheuttaa sähkömoottoreissa momentin pienenemistä, sekä kasvattaa roottorihäviötä. Edellä mainittujen lisäksi joissakin herkissä elektronisissa laiteissa voi esiintyä toimintahäiriöitä epäsymmetrian johdosta. [2, 5, 9]

Standardi asettaa, että 95 % jakelujännitteen vastakomponentin 10 min. tehollisarvon keskiarvoista tulee olla välillä 0 – 2 % myötäkomponentin arvosta. [4, 5]

SENER:n korkeassa laadussa myötäkomponentin arvot tulee olla pienempiä tai yhtä suuria kuin yksi prosentti, 100 % ajasta ja normaalissa laadussa myötäkomponentin arvo tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin puolitoista prosenttia, 100 % ajasta. [4, 5]

### 3.2.8 Jännitteen tasakomponentti

Jännitteen tasakomponentilla tarkoitetaan tasajännitteen arvoa joka esiintyy vaihtosähköverkossa. Tasakomponenttia sähköverkkoon teollisuudessa aiheuttavat muun muassa tasasuuntaajat ja elektroniset ohjauslaitteet. Yleisesti tasakomponentin tasot ovat alhaisia, joten niiden aiheuttamat haitat jäävät vähäisiksi. Kuitenkin esiintyessään tasakomponentti aiheuttaa vaurioita muuntajissa, toimintahäiriöitä herkissä virtapiireissä, sekä korroosiota liitoskohdissa. Täydellisessä ja virheettömässä vaihtosähkössä jännitteen tasakomponentin arvo on nolla, mutta tällaiseen arvoon pääseminen sähköverkkokäytöissä on mahdotonta. [2, 4, 5, 8]

## 4 MITTAUKSET

Sähköverkon laatumittaukset suoritetaan tehtaan kolmelta tärkeimmältä pääkeskukselta, jotka ovat nimetty LF1-, S1- ja S2-pääkeskuksiksi.

Mittauksissa tullaan tarkastelemaan seuraavia arvoja:

- jännite- ja virtatasojen aikavaihtelu
- perustaajuuden aikavaihtelu
- välkynnän Plt- ja Pst-arvojen aikavaihtelu
- jännitteen THD-arvon aikavaihtelu.

Kaikki mittaukset pyritään suorittamaan ajankohtana, jolloin sähköverkon kuormitustilanne vastaa normaalia kuormitustilannetta. Mittausten suorittamista vältetään tilanteissa, jossa verkon kuormitus on vähäistä. Näitä tilanteita vältetään, koska vähäisistä kuormitustilanteista saatavat mittaustulokset antavat vääristyneen kuvan sähköverkon tilasta.

Mittaukset aloitetaan keskukselta LF1 (Liite 2), jonka jälkeen suoritetaan mittaukset keskukselta S2 (Liite 3) ja viimeisenä sähköverkon tilaa mitataan keskukselta S1 (Liite 4). Mittausjakson pituus on standardin vaatima 7 vuorokautta, mutta tilanteen vaatiessa (esimerkiksi vähäinen kuormitus ensimmäisen mittausjakson aikana) mittausta voidaan suorittaa samassa kohteessa pidempäänkin.

### 4.1 Mittalaite

Mittausten mittalaitteena toimii Electrixin valmistama EDFSRML-laatuvahtimittari. Mittari on ominaisuuksiltaan hieman edistyneempi jos sitä verrataan vaikka jokaisesta kotitaloudesta löytyvään kWh-mittariin. Normaalien energiamittausten lisäksi mittarilla on hyvät jännitteen laadun mittaussominaisuudet ja siksi se sopii erinomaisesti tässä työssä käytettäväksi mittariksi.

Mittarilla voidaan mitata seuraavia jännitteen laadun kannalta tärkeitä mittaussuureita:

- jännitetasot vaiheittain
- jännitekuopat ja kohoumat vaiheittain
- jännitteen kokonaissärö vaiheittain
- jännitteen tasakomponentti vaiheittain

- jännitteen epäsymmetria
- välkyntä (lyhytaikainen)
- taajuus
- pätö-, lois- ja näennäisteho vaiheittain
- virrat vaiheittain.

Kaikki mainitut suureet voidaan mitata, sekä yksi-, että kolmivaiheisesta linjaverkosta.  
[1]

Työssä käytetty mittalaite oli koteloitu (Kuva 4.1) erilliseen koteloon sen siirrettävyyden parantamiseksi. Kotelosta löytyi myös mittalaitteen oma GSM-moduuli, sekä syöttöjännitteen sulakkeet. Asentamisen helpottamiseksi mittalaitteessa oli valmiit mittajohdot, jotka olivat helposti kytkettävissä kahteen kotelon ulkopuolelta löytyvään liittimeen. Liittimistä toinen oli varattu virtamittauksen mittajohdoille ja toinen jännitemittauksen mittajohdoille.



**Kuva 4.1** Laatuvahtimittari koteloituna GSM-moduulin ja sulakkeiden kanssa.

#### 4.2 Tietojen tallennus sekä raportointi

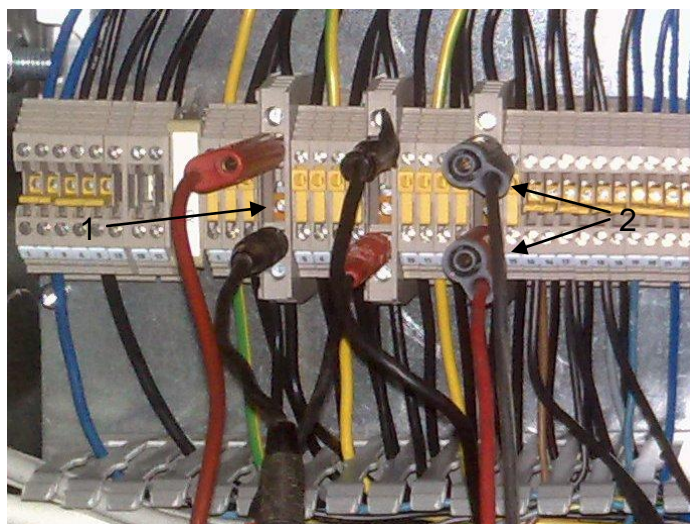
Mittalaite sisältää oman GSM-moduulin, jonka avulla mittalaite ottaa yhteyden sähköyhtiössä sijaitsevaan laatumittaria lukevaan Transmit-ohjelmistoon. Transmit-ohjelmistosta mittauksien tulokset siirretään tietojätkä käsittelevään e-Quality-sovellukseen, jonka avulla on mahdollista laatia myös laaturaportteja.

Kyseisessä työssä mittalaite oli määritetty ottamaan yhteys automaattisesti kerran vuorokaudessa e-Quality-sovellukseen transmit-ohjelmiston kautta. Työssä ei ollut

tarvetta erilliselle mittaustuloksista laaditulle raportille, joten kunkin mittausjakson päätyttyä sähköyhtiö lähetti 7 tai 14 vuorokauden mittaustulokset Excel-listauksena (Liite 5) sähköpostin välityksellä. Listauksesta poimittiin halutut mittaustulokset ja niiden pohjalta laadittiin tarvittavat kuvaajat mittaustulosten raportointiin.

### 4.3 Asennus

Ennen mittalaitteen asennusta mittauskohteeseen piti varmistaa, että mittauskohteesta löytyisi normaalien riviliittimien sijaan mittausriviliittimet (Kuva 4.2). Mittausriviliitin eroaa normaalista riviliittimestä siitä löytyvien mittajohtimien mittausliittimien ja riviliittimen ”katkaistavuuden” ansiosta. Mittausriviliittimen ”katkaisu” on toteutettu pienellä auki ruuvattavalla katkaisupalalla, jota siirtämällä riviliitin saadaan ”katkaistua”.

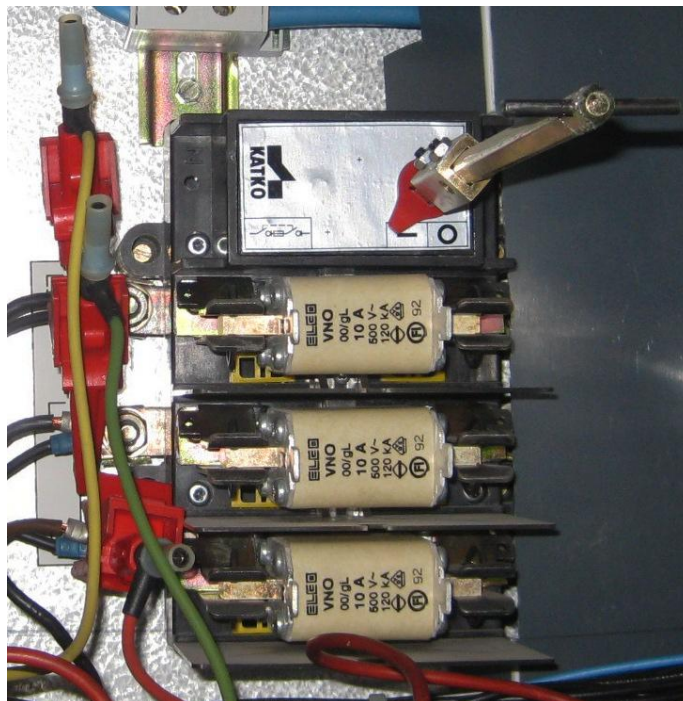


**Kuva 4.2** Mittausriviliittimen katkaisupalalla (1) ja mittausjohtimien mittausliittimet (2).

Mittauskohteessa virtamittaus kytkettiin sarjaan keskuksen jokaisesta vaiheesta löytyvän virtamuuntajan kanssa, joten virtamittausta varten mittausjohtoja oli kaksi kappaletta jokaista vaihetta kohti. Mittajohdot kytkettiin virtamuuntajien mittausriviliittimiin kuvan 4.2 tavalla. Mittajohdot kytkettäessä piti ottaa huomioon, että toinen kytkettävistä johdoista oli mittariin virtaa vievä mittajohto ja toinen sieltä pois tuleva. Jos mittajohdot jostain syystä oli kytketty väärinpäin, ilmoitti mittalaite siitä kyllä myöhemmin. Kun virtamittauksen mittajohdot oli onnistuneesti kytketty, voitiin katkaisupalojen aukaiseminen aloittaa mittausriviliitin kerrallaan.

Jännitemittausta varten jokaiselle vaiheelle oli yksi mittajohto. Mittajohdot kytkettiin joko lähdestä löytyviin kolmivaihesulakkeisiin (Kuva 4.3) tai riviliitinlähtöihin.

Jännitemittauksesta saatavaa jännitettä käytettiin myös mittalaitteen käyttöjännitteenä, joten jännitemittauksen kytkennän jälkeen laitteesta pystyttiin tarkastamaan aiemmin kytkettyjen virtamittauksen mittajohtojen asennuksen oikeellisuus.



**Kuva 4.3** Jännitemittauksen mittajohtimet kiinnitetty lähdöstä löytyviin kahvasulakkeisiin.

Asennuksen viimeisenä vaiheena oli ilmoittaa mittaustietoja tallentavalle sähköyhtiölle keskukselta löytyvien virtamuuntimien muuntosuhdeluku. Muuntosuhdeluvulla tarkoitetaan virtamuuntajan ensiö- ja toisiokäämien virtojen suhdetta. Jos muuntosuhdelukua ei olisi vaihdettu jokaisen mittaustuloksen jälkeen oikeaksi, saadut mittaustulokset olisivat olleet virheellisiä.

## 5 SÄHKÖVERKON LAATUMITTAUKSEN TULOKSET

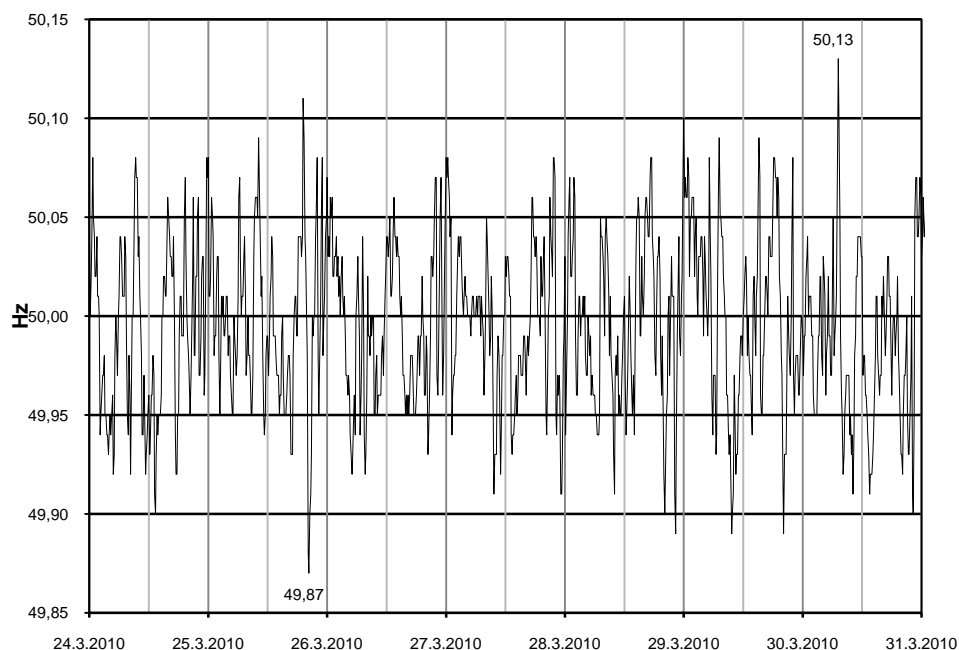
Mittaustuloksia tarkasteltiin pääkeskus kerrallaan, saaduista mittaustuloksista luotujen kuvaajien avulla. Jokaisen mittaustuloksen kuvaaja luotiin seitsemän vuorokauden mittausjakson aikana saatujen 10 min. keskiarvojen pohjalta. Mittaustuloksia tarkastellessa pitää ottaa siis huomioon, että kyseiset arvot eivät ole hetkellisiä mittaussarvoja.

### 5.1 Pääkeskus LF1

Pääkeskus LF1 2 500 A:n pääkeskus, jossa pääkytkimen koko on 2 500 A ja jonka muuntaja on kooltaan 1 150 kVA.

#### 5.1.1 Taajuus

Seitsemän vuorokauden mittausjakson aikana LF1:stä mitattu taajuuden (Kuva 5.1) huippuarvo oli 50,13 Hz, joka tarkoittaa 0,26 % nousua ja alimmillaan taajuus laski 49,87 Hz, joka tarkoittaa 0,26 % laskua. Voidaan selvästi huomata, että mittauksen aikana LF1:stä mitattu taajuus pysyi standardin mukaisissa rajoissa ja täten täytti standardin vaatiman laadun.

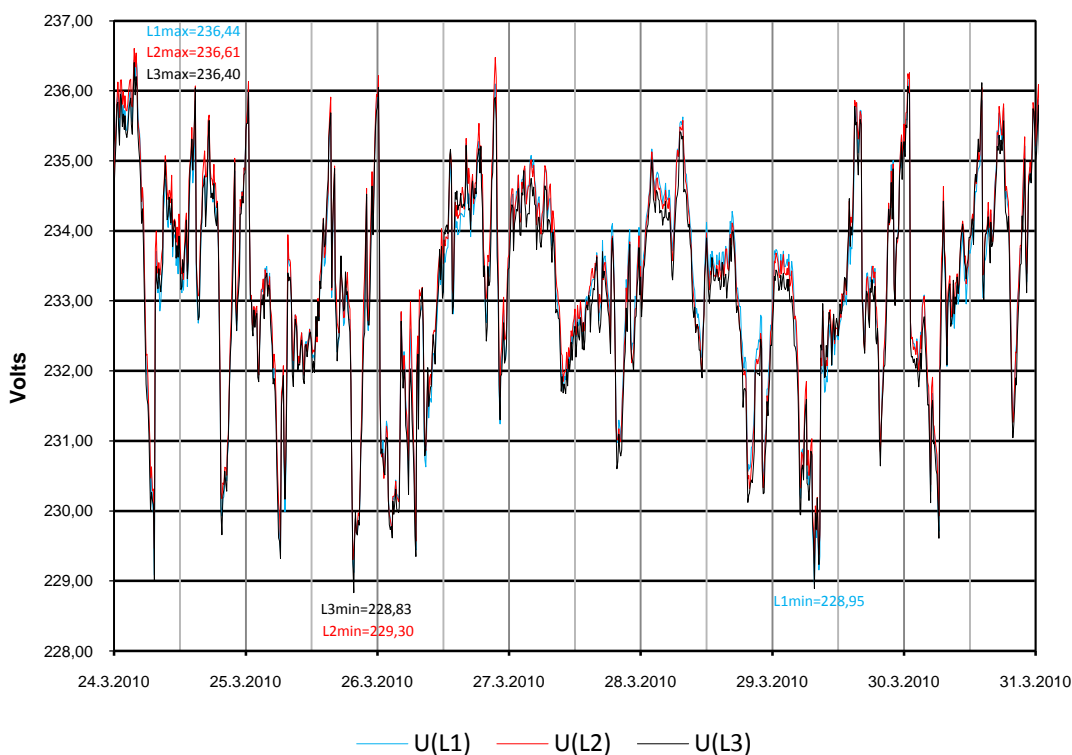


**Kuva 5.1** Pääkeskuksesta LF1 mitattu taajuus ajan funktiona.

Taajuus täyttää myös SENER:n korkean laadun vaatimukset taajuuden pysyessä 100 % ajasta alle  $\pm 0,5$  %:n.

### 5.1.2 Jänniteen suuruus

LF1-pääkeskuksesta mitatun L1 vaihejännitteen (Kuva 5.2) maksimiarvo koko mittauksen aikana on 236,44 V, L2 vaihejännitteen 236,61 V ja L3:n maksimi arvo on 236,40 V. Prosentuaalisesti kaikki jännitteet ovat nousseet noin 2,8 %. Alimmillaan L1 vaihejännite laski 228,95 V, L2 vaihejännite 229,30 V ja L3:n minimiarvo oli 228,83 V. Jännitteiden lasku prosenteissa oli 0,3 – 0,5 %:n välillä. Kaikkien keskuksesta mitattujen jännitteiden maksimi- ja miniarvot pysyivät selvästi standardin määrittelemien raja-arvojen sisällä.

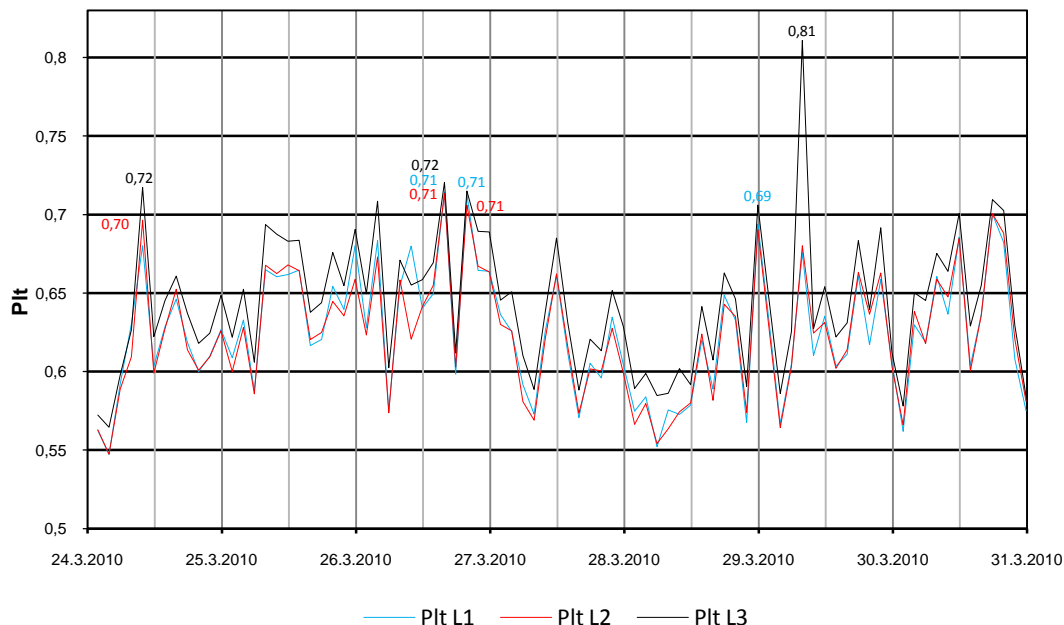


**Kuva 5.2** LF1-pääkeskuksesta mitatut vaihejännitteet ajan funktiona.

Jännitteet pysyvät koko mittauksen ajan  $\pm 10$  V sisällä nimellisjännitteestä ja näin ne täyttävät myös SENER:n korkean laadun kriteerit.

### 5.1.3 Välkyntä

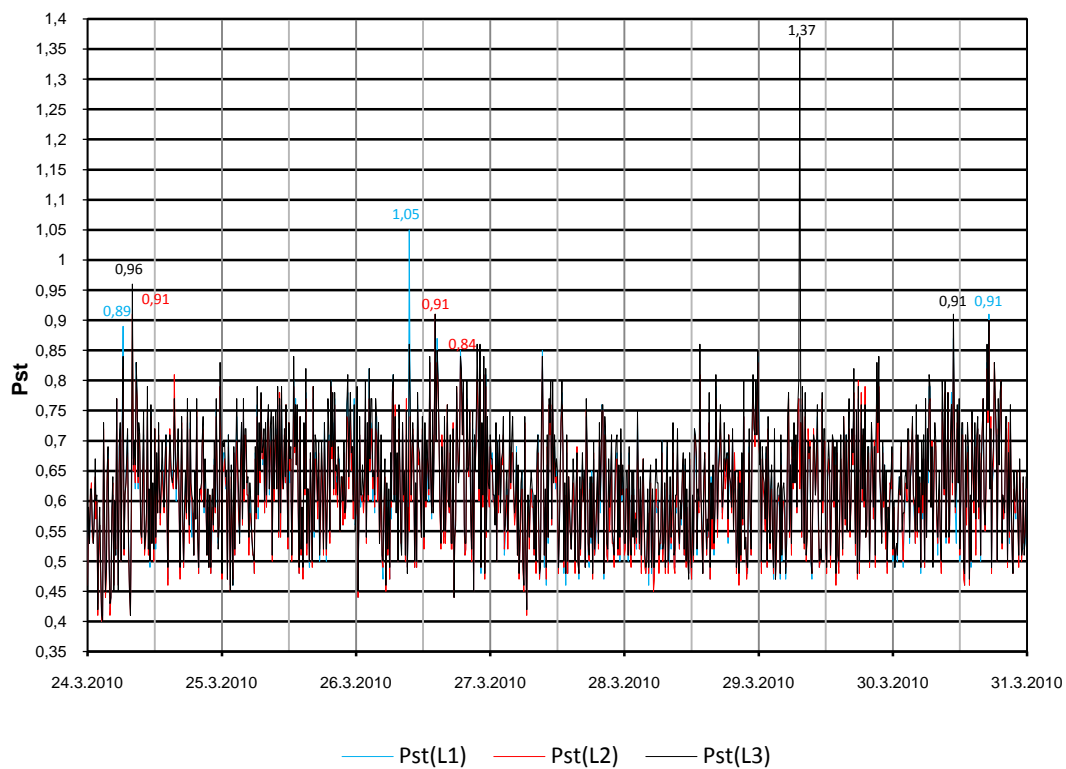
Mittausjakson aikana mitattu välkyntän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin (Kuva 5.3) maksimiarvo on korkeimmillaan L1- ja L2-vaiheessa arvolla 0,71 ja L3 vaiheessa arvolla 0,81. Mittauksista saadut Plt-arvot pysyvät koko mittausjakson ajan selvästi standardissa määriteltujen raja-arvojen alapuolella.



**Kuva 5.3** LF1-pääkeskuksesta mitattujen Pst-arvojen perusteella lasketut välkyntän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin arvot ajan funktiona.

Standardi ei aseta lyhytaikaiselle häiritsevyyssindeksille erillisiä raja-arvoja, mutta Plt-arvojen lisäksi SENER käyttää Pst-arvoja apuna sähkön laadun määrittelyssä. Lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksin kolmanneksi suurimman arvon ( $P_{st,3max}$ ) tulisi olla 100 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin yksi ja Plt-arvon tulisi olla 100 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin 0,8, jotta korkea laatu saavutettaisiin. Kuvasta 5.4 havaitaan, että koko mittausjakson aikana kolmanneksi suurin Pst-arvo on L3-vaiheesta mitattu 0,96 ja tältä osin korkean laadun määritelmä täytettäisiin. Sähkön korkea laatu jää kuitenkin saavuttamatta, koska Plt-arvo käy korkeimmillaan 0,81:ssä. Plt-arvo on kuitenkin 100 % ajasta alle yhden, joten normaalin laadun määritelmä täyttyy selvästi.

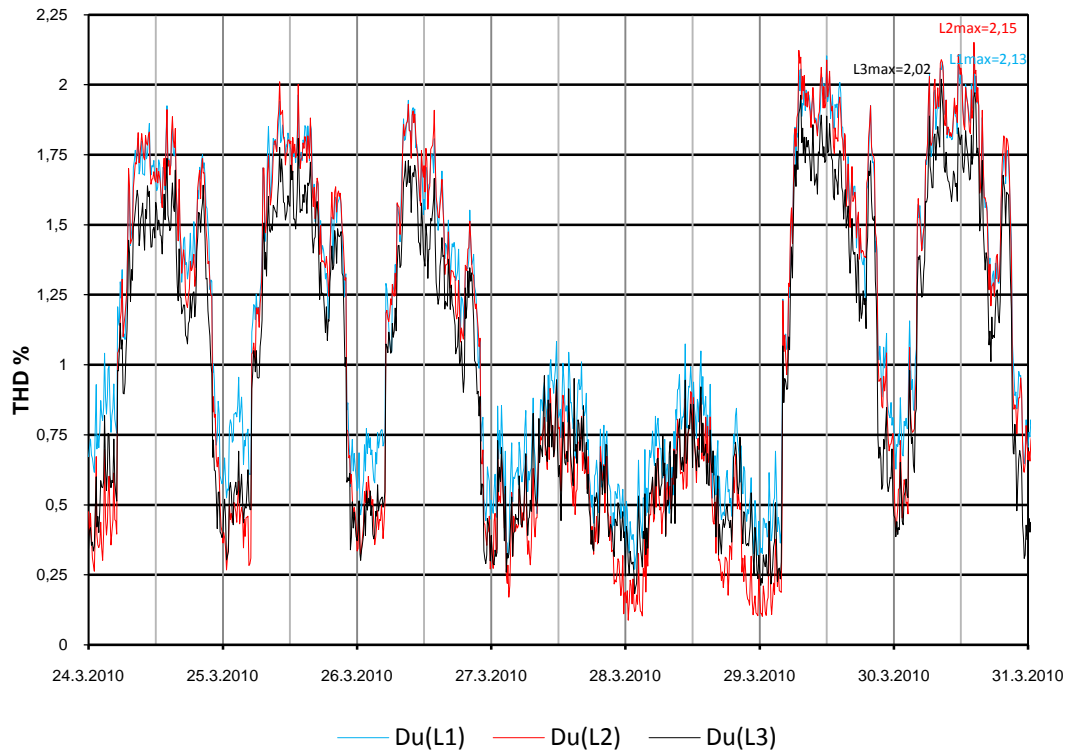




**Kuva 5.4** LF1-pääkeskuksesta mitatut välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyysindeksi arvot ajan funktiona.

#### 5.1.4 Jännitesärön aikavaihtelu

Pääkeskus LF1:stä mitattujen THD-arvojen 10 min. keskiarvot (Kuva 5.5) käyvät korkeimmillaan 2,15 %:ssa. Standardin määrittelemän raja-arvon alapuolella pysytään selvästi, koska standardi määrittää, että THD-arvon on oltava 95 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin 8 % nimellisjännitteestä.



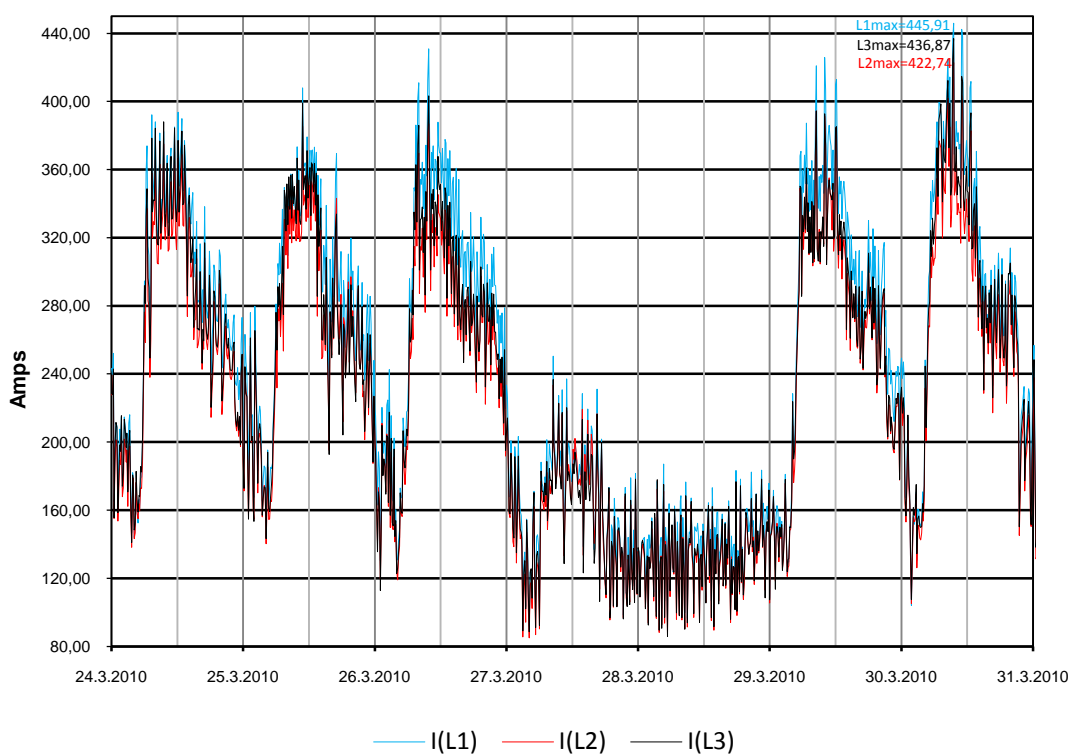
**Kuva 5.5** LF1-pääkeskuksesta mitattu THD-arvojen aikavaihtelu ajan funktiona.

LF1:stä mitattu THD-arvo täyttää myös SENER:n korkean sähkön laadun vaatimukset. THD-arvo on koko mittauksen ajan pienempi tai yhtä suuri kuin 3 % nimellisjännitteestä.

Kuvasta 5.5 huomataan, että jännitteen säröytyminen on viikolla hyvin samankaltaista kuormitustilanteen ollessa normaali. Kuormituksen laskiessa viikonloppuna (27. – 28.3.) myös jännitteen säröytyminen laskee erittäin alhaiselle tasolle.

### 5.1.5 Vaihevirrat

Vaihevirtojen mittauksen aikana saaduista tuloksista huomataan (Kuva 5.6), että vaihevirtojen välillä ei ole suuria eroavaisuuksia ja yksittäisiä suuria virtapiikkejä ei esiinny. Tämä kertoo pääkeskuksen LF1-lähdöissä olevien kuormien tasaisista kytkeytymisistä ja yleisesti tasaisesta kuormitustilanteesta. Virrat pysyvät muiltakin osin koko mittausjakson ajan melko tasaisina suurimpien 10 min. keskiarvoista saatujen piikkien jäädessä L1-vaiheen osalta 445,91 A:iin, L2-vaiheen osalta 422,74 A:n ja L3-vaiheen osalta 436,87 A:n. L1-vaiheen yksittäinen virtapiikki on vain noin 60 – 70 A yli normaalien keskiarvoista saatujen huippuarvojen, joten mitään huolestuttavaa ei vaihevirroista ole havaittavissa.



**Kuva 5.6** LF1-pääkeskuksesta mitatut vaihevirrat ajan funktiona.

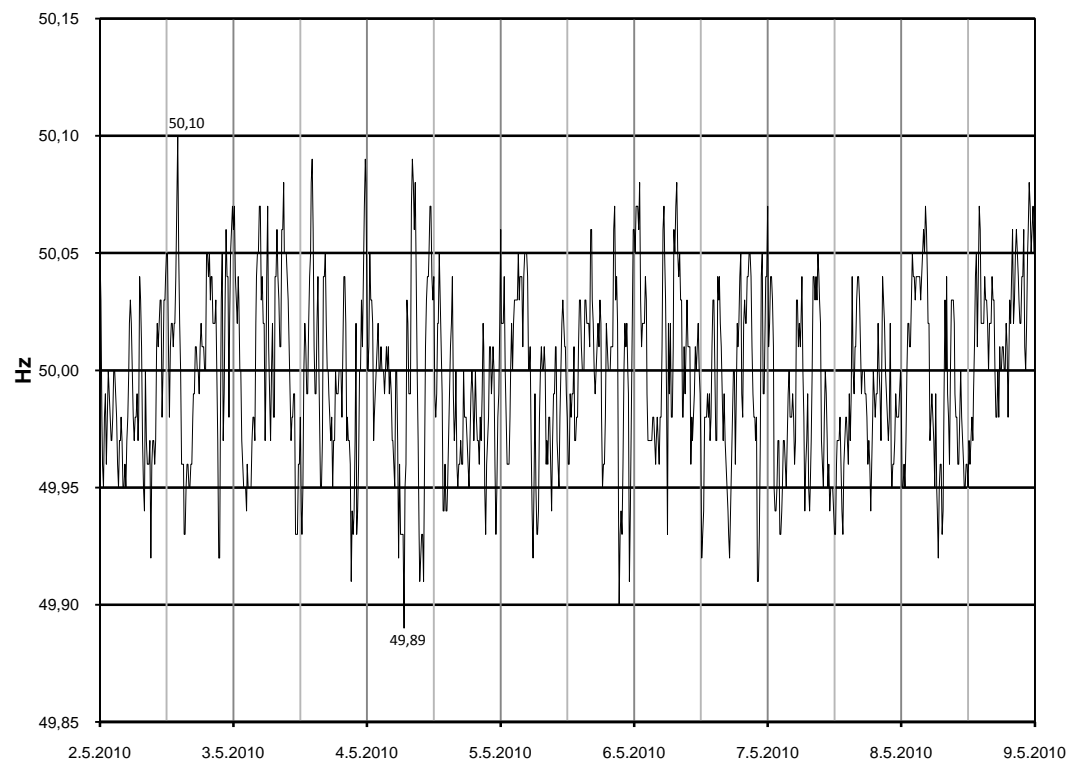
## 5.2 Pääkeskus S1

Pääkeskus S1 2 500 A:n pääkeskus, jossa pääkytkimen koko on 2 500 A ja jonka muuntaja on kooltaan 2 000 kVA

### 5.2.1 Taajuus

S1-pääkeskuksesta mitatun taajuuden 10 min:n mittaustulosten keskiarvosta saatu huippuarvo on 50,10 Hz ja minimiarvo 49,89 Hz (Kuva 5.7). Taajuus muuttui hetkellisesti maksimissaan 0,2 % yli 50 Hz ja 0,22 % alle 50 Hz.

Taajuus pysyy koko mittausjakson ajan täysin standardin mukaisena ja täyttää myös SENER:n suositusten mukaisesti korkean laadun kriteerit.

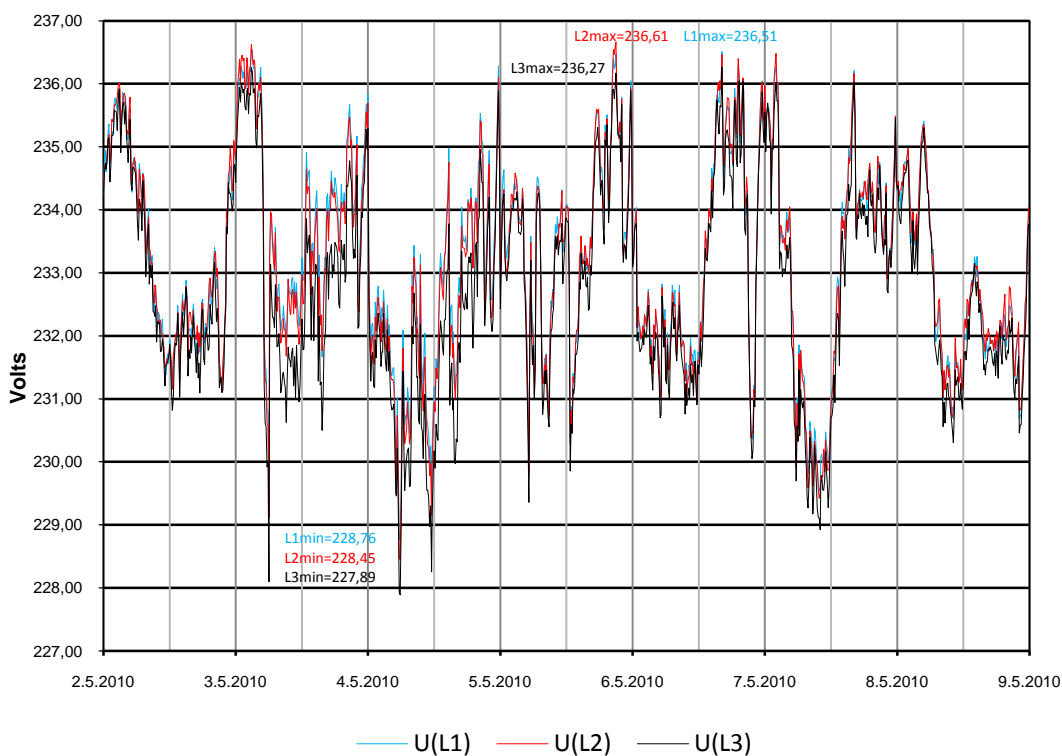


**Kuva 5.7** S1-pääkeskuksesta mitattu taajuus ajan funktiona.

### 5.2.2 Jännitteen suuruus

S1-pääkeskuksesta mitattu jännitteen maksimi-arvo (Kuva 5.7) on L2-vaiheen 236,61 V. Vaiheen L1-mitattu maksimi-arvo on 236,51 V ja L3-vaiheen 236,27 V. Alimmillaan jännite käy 227,89 V:ssa L3-vaiheessa. L1-vaiheesta pienin mitattu jännitteen arvo on 228,76 V ja L2-vaiheesta 228,45 V. Jännite nousee prosentuaalisesti maksimissaan 2,9 % ja laskee 0,9 %.

Jännitteet pysyvät selvästi + 10 % / – 15 % sisällä jännitteen nimellisarvosta, joten kaikki mitatut vaihejännitteet pysyvät standardin määrittelemien raja-arvojen sisällä. SENER:n korkea laadun kriteerit saavutetaan myös rajojen ollessa  $\pm 10$  V jännitteen nimellisarvosta 100 % ajasta.



**Kuva 5.7** S1-pääkeskuksesta mitatut vaihejännitteet ajan funktiona.

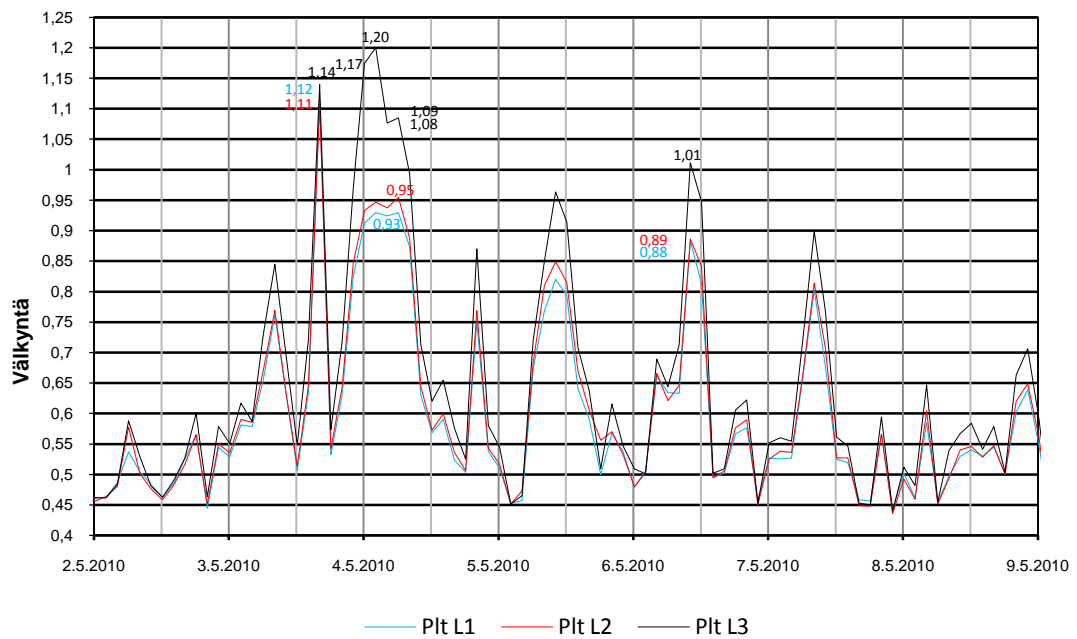
### 5.2.3 Välkyntä

S1-pääkeskuksesta mitattu välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin (Kuva 5.8) maksimiarvo on L3-vaiheesta saatu 1,20. Maksimiarvon lisäksi standardin määrittelemä Plt:n raja-arvo ylitetään L3-vaiheessa mittausjakson aika useaan otteeseen. L3-vaiheen lisäksi L2- ja L1-vaiheessa raja-arvo ylitetään kertaalleen.

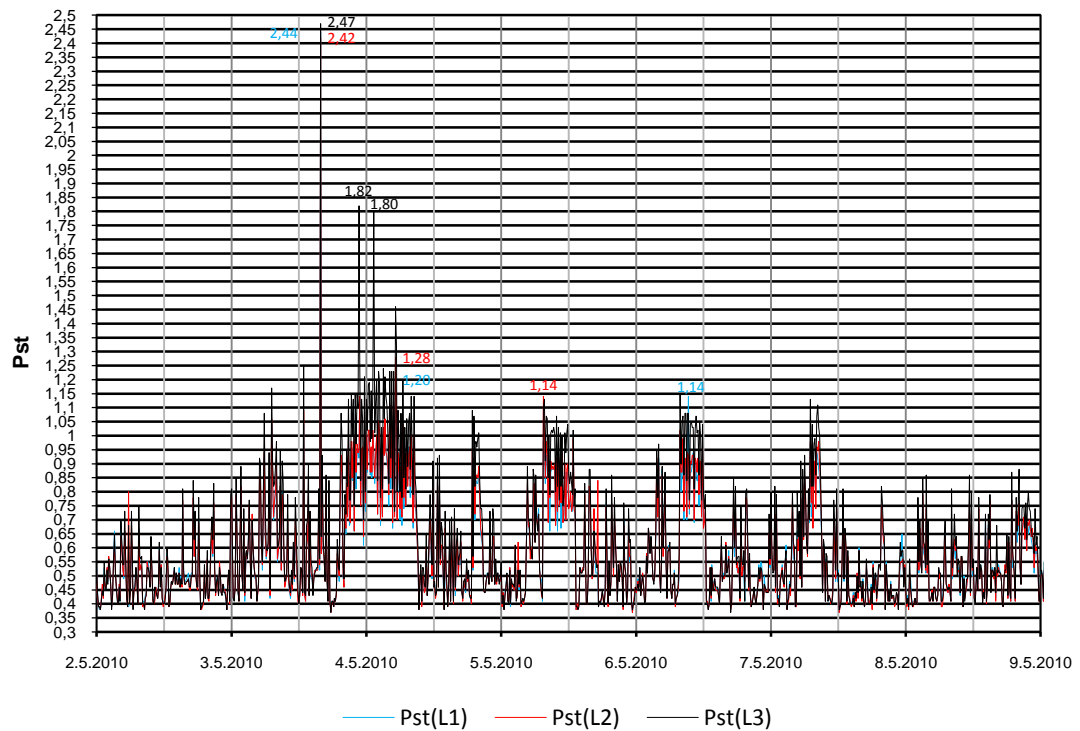
Välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin arvo lasketaan 12:sta 10 min:n Pst-arvon (Kuva 5.9) keskiarvosta kaavan (1) avulla, joten yksi Plt-arvo saadaan 120 min:n ajalta. Standardin määrittelemä raja-arvo ylitetään jo pelkästään L3-vaiheen osalta kuusi kertaa eli vaiheen Plt-arvot ovat yhteensä 720 min:a (7,14 %) mittausjaksosta yli standardin määrittelemän raja-arvon. Kun L3-vaiheen arvoihin lisätään vielä L1- ja L2-vaiheen ylitykset, voidaan selvästi todeta, että S1-pääkeskuksesta mitatut Plt-arvot eivät ole standardin mukaisia.

Välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin ollessa hetkellisesti yli yhden, edes SENER:n normaalin laadun kriteerit eivät täyty.

S1-pääkeskusten suurimpina kuormina toimivat lähes koko tehtaan valaistukeskusten syötöt sekä muutama pienempi n. 100 kW:n mäntäkompressori. Lisäksi huomioitavaa on, että päivinä 5. – 7.5 esiintyi suhteellisen voimakasta välkyntää (Kuva 5.8), vaikka kyseisinä päivinä oli meneillään SEL:n (Suomen Elintarviketyöläisten Liitto Ry) lakko. Jatkotoimenpiteinä on mietittävä kuormien tasaisempaa jakamista muiden keskusten kesken sekä yksityiskohtaisempia mittauksia jännitetasojen nopeista vaihteluista.



**Kuva 5.8** S1-pääkeskuksesta mitattujen Pst-arvojen perusteella lasketut välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin arvot ajan funktiona.

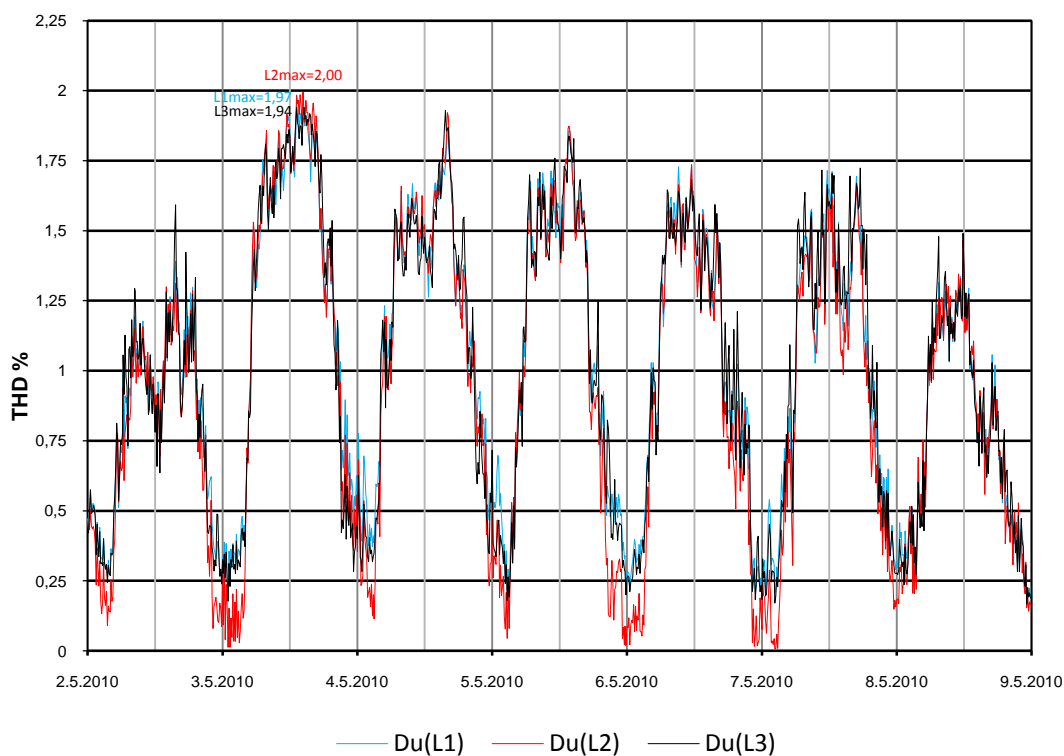


**Kuva 5.9** S1-pääkeskuksesta mitatut välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksi arvot ajan funktiona.

#### 5.2.4 Jännitesärön aikavaihtelu

S1-pääkeskuksesta mitattujen THD-arvojen (Kuva 5.10) 10 min:n keskiarvojen huippuarvo viikon mittausjakson aikana on L2-vaiheen 2,00 %. Mitattu huippuarvo pysyy selvästi alle standardin määrittelemän 8,0 % nimellisjännitteestä. Jännitteen säröytymisen ollessa hyvin vähäistä, täyttää S1-pääkeskuksesta mitatut arvot SENER:n korkean laadun määritelmät.

Jännitteen säröytymisessä on huomattavissa hyvin pientä hajontaa työviikon aikana (3. – 7.5) vaikka 5. – 7.5 olivat SEL:n lakkopäiviä. Arvojen hajonta ei kuitenkaan johda minkäänlaisiin jatkoselvityksiin hajonnan jäädessä suurimmillaan alle 0,26 %. Työviikon päättyessä (8.5.) THD-arvot asettuvat alle 1,5 %:n, joten vertaillen tätä lukua työviikon aikana saatuihin mittauksilukuihin, huomataan, että kuormituksen ollessa normaalia tai vähäistä ei THD-arvojen välillä ole suurta eroa.



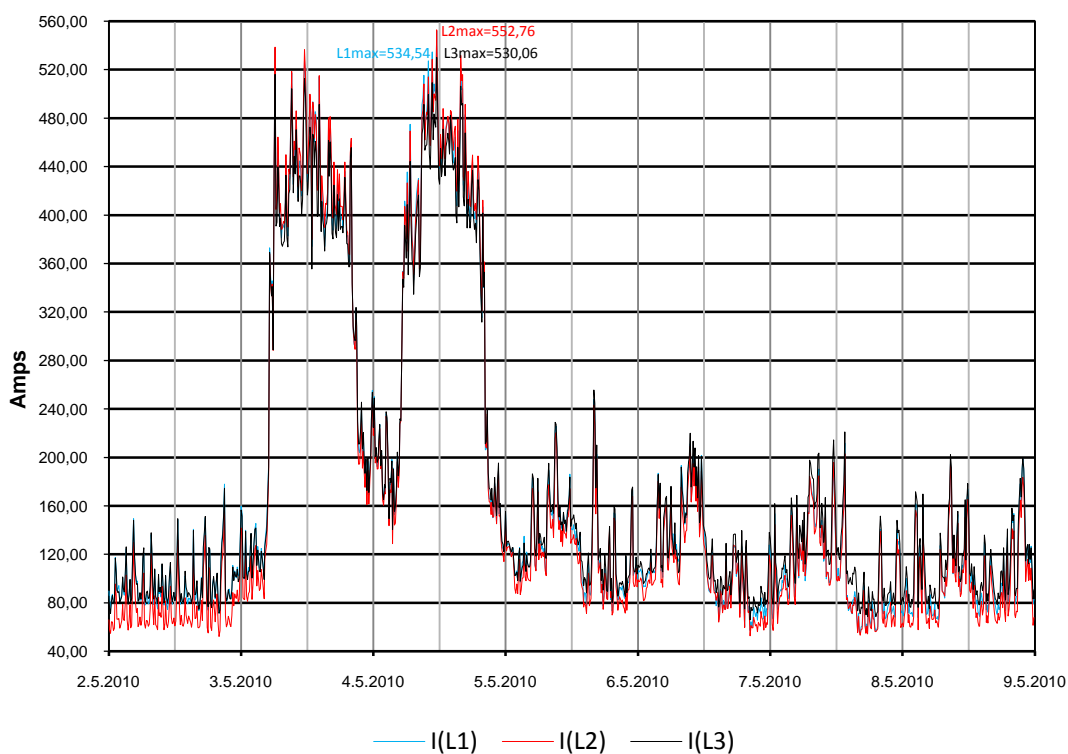
**Kuva 5.10** S1-pääkeskuksesta mitattu THD-arvojen aikavaihtelu ajan funktiona.



### 5.2.5 Vaihevirrat

Lakkopäivistä johtuen S1-pääkeskuksesta (Kuva 5.11) saatiin luotettavia mittaustuloksia ainoastaan kahden päivän osalta. Näiden kahden päivän osalta kuitenkin huomataan, että jokaisen vaiheen virrat käyttäytyvät suhteellisen symmetrisesti, eikä vaiheiden välillä ole suurempia eroja.

Suurimmat virta-arvot mitattiin 4.5. jolloin L1-vaiheen suurin virta-arvo oli 534,54 A, L2-vaiheen 552,76 A ja L3-vaiheen 530,06 A. Maanantaina 3.5. mitatut arvot eivät suuremmin eroa 4.5. mitatuista huippuarvoista, joten voidaan todeta S1-pääkeskuksen kuormitustilanteen olevan ainakin virtojen osalta kunnossa. Tiistain 4.5. jälkeen virrat laskeutuvat noin 200 A:n tasolle lakkopäivistä johtuen.



**Kuva 5.11** S1-pääkeskuksesta mitatut vaihevirrat ajan funktiona.

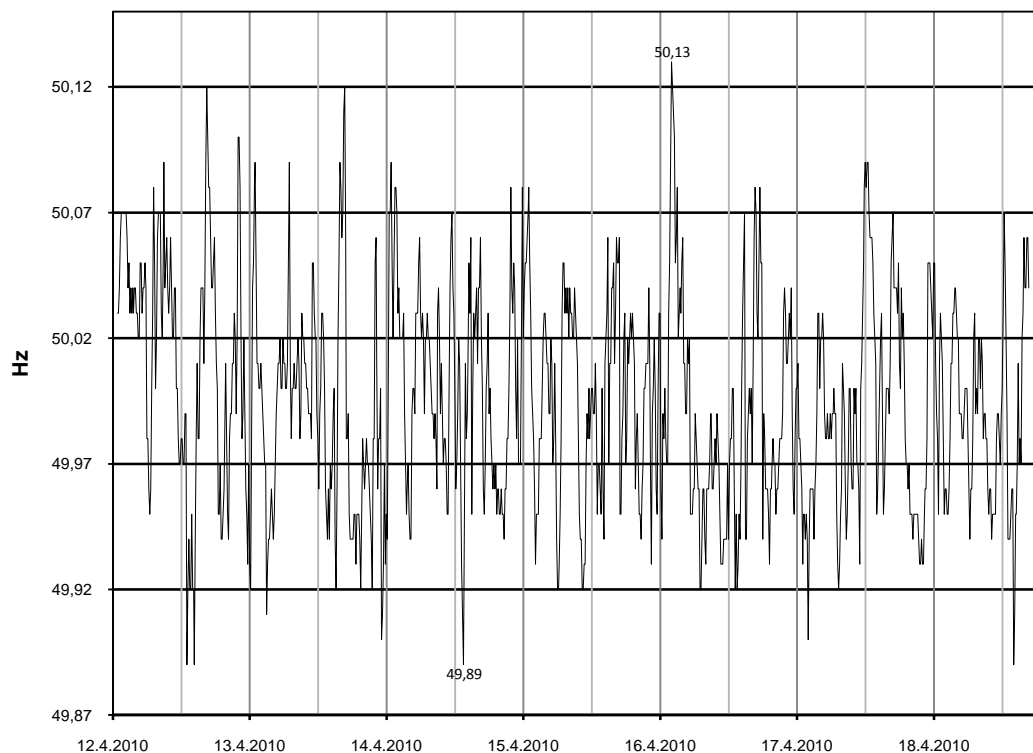
### 5.3 Pääkeskus S2

Pääkeskus S2 3 150 A:n pääkeskus, jossa pääkytkimen koko on 3 200 A ja jonka muuntaja on kooltaan 3 200 kVA.

#### 5.3.1 Taajuus

Mittausjakson aikana S2-pääkeskuksesta saatu taajuuden huippuarvo (Kuva 5.12) oli 50,13 Hz ja alimmillaan taajuus oli 49,89 Hz. Perustaajuuteen verrattuna taajuus nousi hetkellisesti maksimissaan 0,13 Hz eli 0,26 % ja laski 0,11 Hz eli noin 0,22 %.

Koko seitsemän päivän ajan taajuus pysyi selvästi standardin määrittelemissä raja-arvoissa ja tämän lisäksi taajuus täytti SENER:n korkean laadun kriteerit.



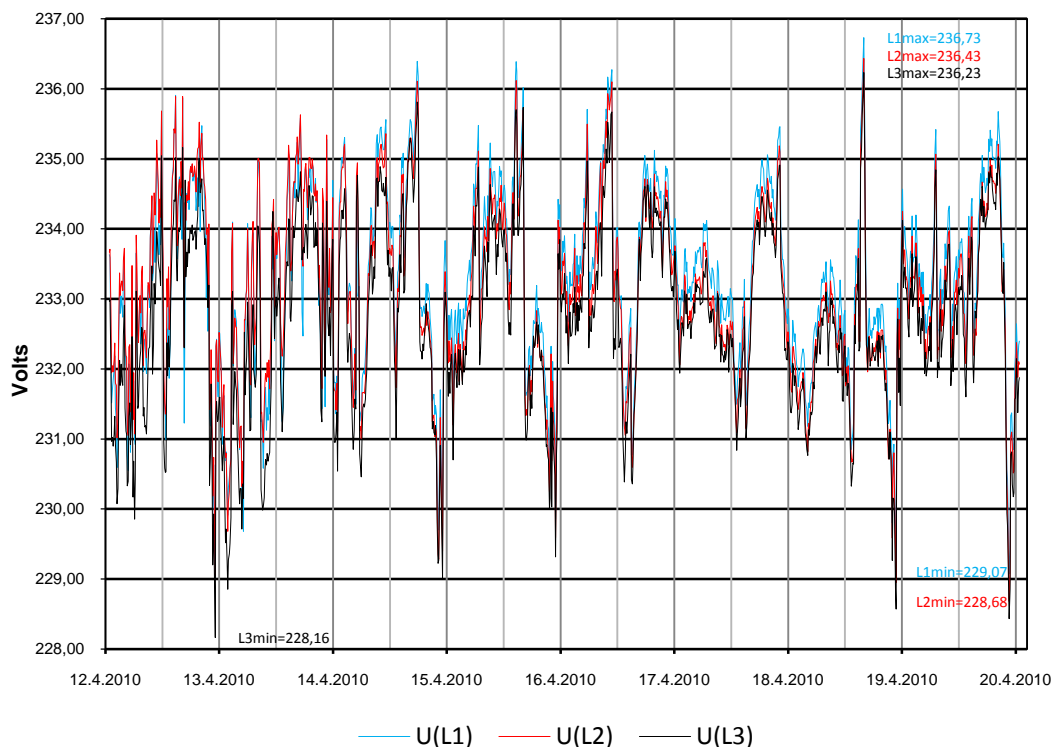
**Kuva 5.12** S2-pääkeskuksesta mitattu taajuus ajan funktiona.

### 5.3.2 Jännitteen suuruus

S2-pääkeskuksesta mitattujen vaihejännitteiden (Kuva 5.13) kaikki maksimiarvot löytyvät 18.4. mitatuista arvoista. Mittauksista saatu suurin maksimiarvo mitattiin L1-vaiheesta jännitearvolla 236,73 V. Toiseksi suurin arvo oli L2-vaiheesta mitattu 236,43 V ja pienin maksimiarvo oli L3-vaiheen 236,23 V. Jännitteen nousu oli suurimmillaan siis 6,73 V eli 2,9 %.

Mittausjakson aikana jännitteen pienin mittausarvo saatiin 12.4. L3-vaiheesta arvolla 228,16 V. L1-vaiheesta mitattiin jännitteen arvo 229,07 V ja L3-vaiheesta 228,68 V. Jännite laski maksimissaan 1,84 V eli noin 0,8 %.

Keskuksesta mitatut vaihejännitteet ovat selvästi standardin määrittelemien raja-arvojen sisällä ja täyttävät näin standardin vaatiman tason. SENER:n suositusten mukaan kyseessä on korkea laatu.



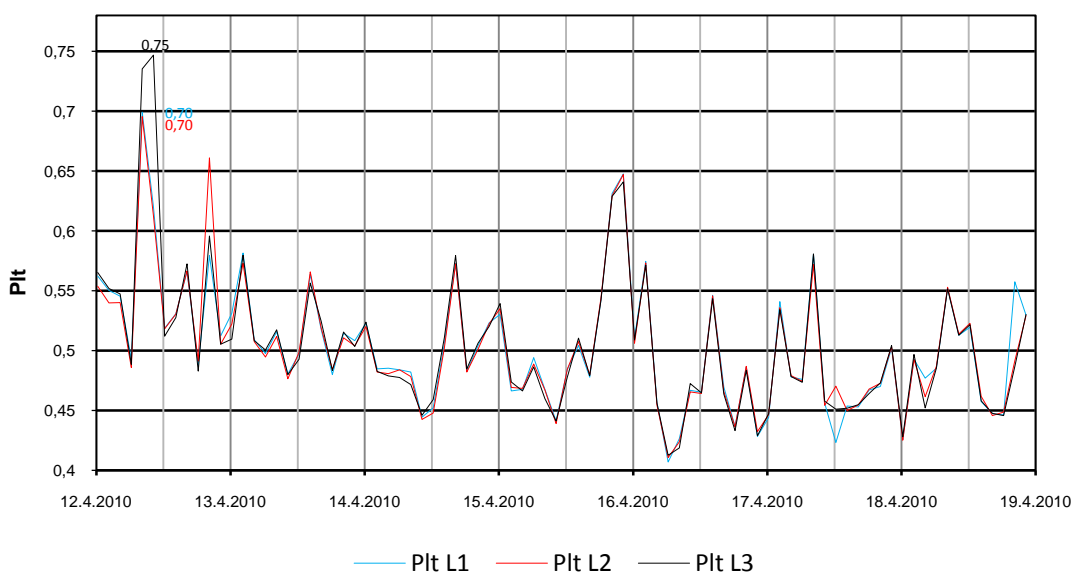
**Kuva 5.13** S2-pääkeskuksesta mitatut vaihejännitteet ajan funktiona.

### 5.3.3 Välkyntä

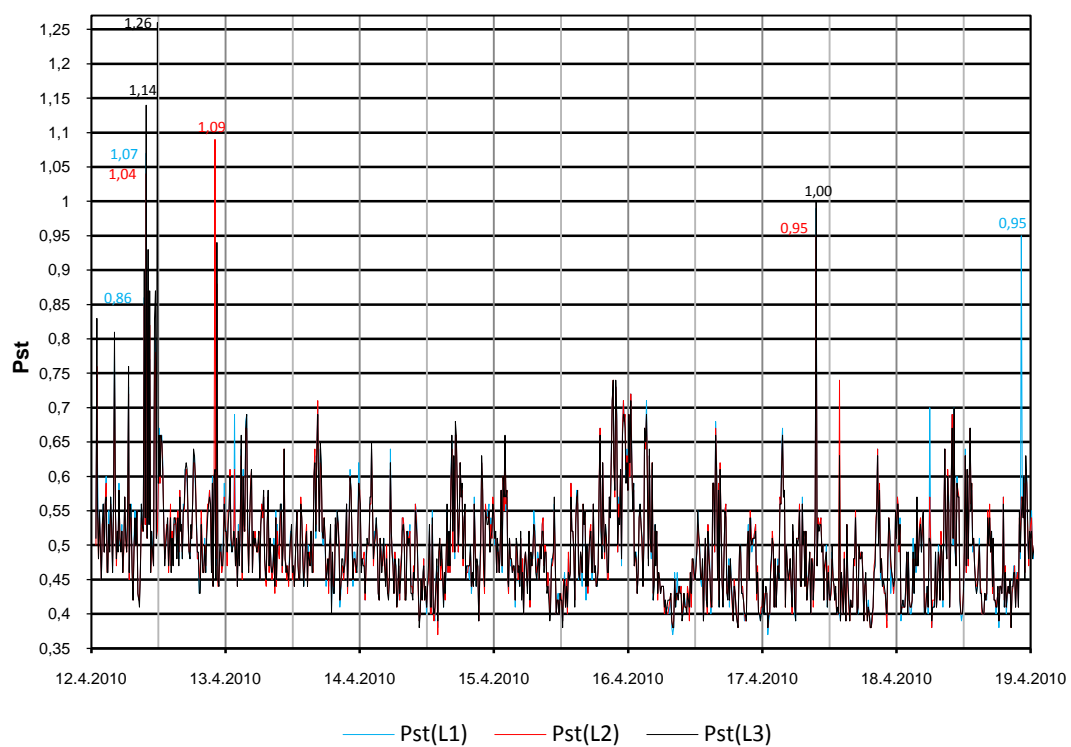
Mittausjakson aikana S2-pääkeskuksen välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin maksimiarvo (Kuva 5.14) oli L3-vaiheesta mitattu 0,75. Kaksi seuraavaksi suurinta arvoa olivat L1- ja L3-vaiheesta mitattu 0,70. Mittausjakson aikana saadut arvot pysyivät selvästi standardissa määriteltujen raja-arvojen sisällä ja näin ollen ne täyttivät standardin vaatimukset.

S2-pääkeskuksesta mitattu välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin (Kuva 5.15) kolmanneksi suurin maksimiarvo on L2-vaiheesta mitattu 1,09. Korkeimmillaan Pst,max-arvo käy 1,26 L3-vaiheessa. SENER:n määrittelemien raja-arvojen mukaan keskuksen välkyntä ei saavuta korkean laadun määritelmiä, koska Pst,3max arvo ei ole 100 %:a ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin yksi. Normaalilaatu kuitenkin saavutetaan Plt,max-arvon ollessa 100 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin yksi.

Alkuviikon (12. – 13.4.) aikana tapahtuneet voimakkaammat välkynnät johtuvat suurimmaksi osaksi tuona aikana suoritetusta tuotannon koeajasta, joka nosti keskuksen kuormitusta huomattavasti.



**Kuva 5.14** S2-pääkeskuksesta mitattujen Pst-arvojen perusteella lasketut välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin arvot ajan funktiona.

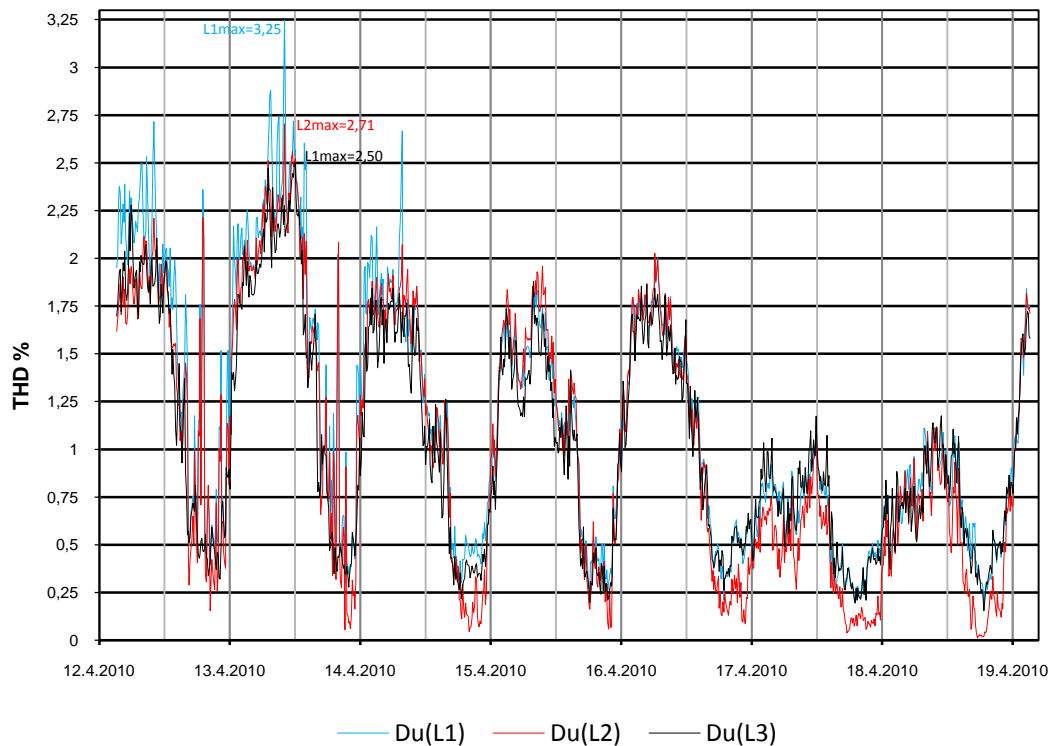


**Kuva 5.15** S2-pääkeskuksesta mitatut välkynnän lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksi arvot ajan funktiona.

### 5.3.4 Jännitesärön aikavaihtelu

Keskuksesta mitatut jännitesäröjen 10 min:n keskiarvot (Kuva 5.16) kävivät korkeimmillaan 3,25 %:ssa L1-vaiheessa. L2-vaiheessa THD-arvo oli korkeimmillaan 2,71 % ja L3-vaiheessa 2,50 %. THD-arvojen pysyivät koko mittausjakson ajan alle 8,0 %:ssa joten kyseessä standardin mukainen jännite, joka täyttää myös SENER:n korkean laadun.

Työviikon aikana (12. – 17.4.) jännitteen säröytymisessä on havaittavissa pientä hajontaa päivien 12. – 14.4. osalta. Jännite säröytyy voimakkaimmin L1-vaiheessa, kuten kuvasta 5.16 huomataan. Loppuviikon osalta säröytyminen kuitenkin palautuu normaalille tasolle eikä yksittäisiä piikkejä enää esiinny. Alkuviikon piikit selittyvät suurimmilta osin tuotannon muuttuvista kuormitusilanteista ja testiajosta.

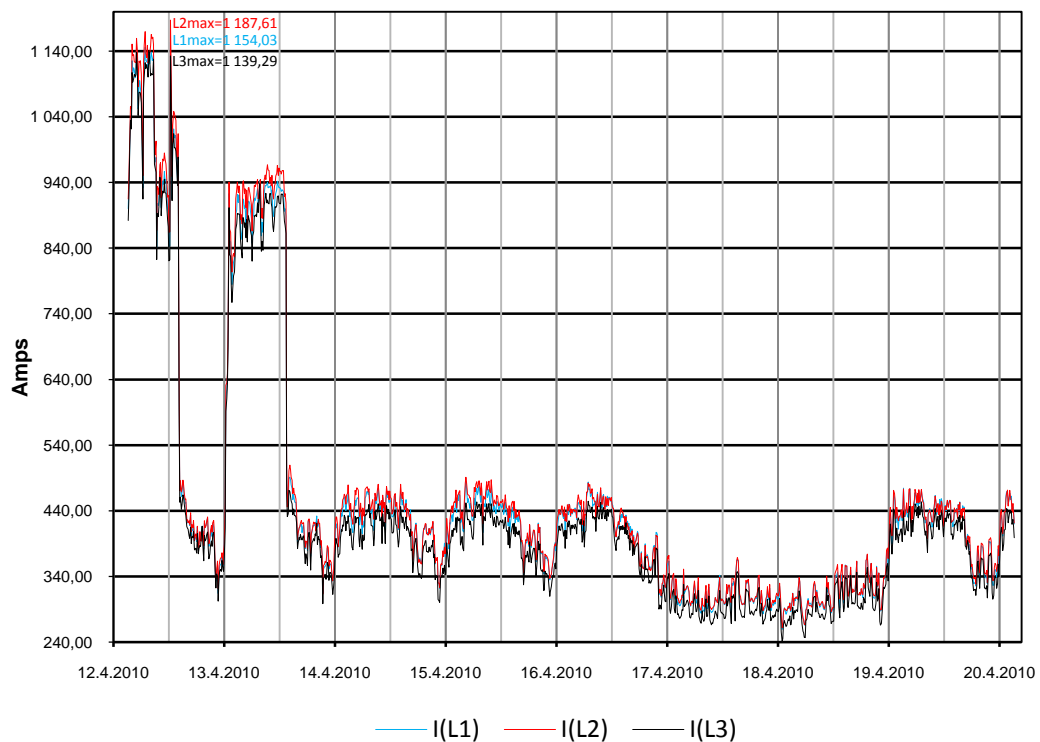


**Kuva 5.16** S2-pääkeskuksesta mitattu THD-arvojen aikavaihtelu ajan funktiona.

### 5.3.5 Vaihevirrat

S2-pääkeskuksesta saaduista virta-arvoista (Kuva 5.17) huomataan, että alkuviikon virta-arvot ovat huomattavasti loppuviikkoa korkeammat. Suurin virran maksimiarvo oli 1187,61 A L2-vaiheessa, jonka jälkeen suurimmat arvot olivat 1154,03 A L1-vaiheessa ja 1139,29 A L3-vaiheessa.

Korkeat virta-arvot selittyvät viikon alkupuolella suoritettulla testiajolla, jonka seurauksena virtatasot nousevat huomattavasti. Kovasta kuoritusilanteesta huolimatta vaihevirrat käyttäytyvät samankaltaisesti eikä eri vaiheiden virtojen välillä ole suurta hajontaa. Testiajon jälkeen virtataso laskeutuu noin 450 A tasolle mikä lienee olevan keskuksen normaali kuormitustila ainakin puolet vuodesta.



**Kuva 5.17** S2-pääkeskuksesta mitatut vaihevirrat ajan funktiona.

## 6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa teollisen sähköverkon tila sen normaaleissa käyttöolosuhteissa. Kartoitus tehtiin mittaamalla sähköverkkoa pääkeskus kerrallaan, minkä jälkeen saatuja mittaustuloksia analysoitiin EN 50610-standardin raja-arvojen ja määritelmien avulla.

Tulokset osoittivat aikaisemmista epäilyksistä huolimatta, että jännitepiikkien ja jännitetasojen nousujen esiintyminen sähköverkossa oli erittäin vähäistä, mutta havainnot voimakkaasta välkynnästä osoittautuivat sen sijaan täysin aiheellisiksi.

Saatujen tuloksien perusteella pystytään sulkemaan pois jännitepiikkien ja jännitetasojen nousujen osuus tuotannon sekä kunnossapidon tiloissa aiheutuneista laiterikoissa. Välkynnästä saadut tulokset osoittivat sen, että tietyissä osissa tehdasrakennusta välkyntä on erittäin voimakasta ja sitä esiintyy varsinkin kovissa kuormitustilanteissa. Välkynnän osalta tutkimustyötä on vielä jatkettava, jotta syy voimakkaaseen välkyntään löytyisi.

Saatuja mittaustuloksia pystytään jatkossa hyödyntämään, kun mietitään uusien tuotantolinjojen rakentamista tai mahdollisten jakokeskusten lisäämistä tuotantotiloihin. Lisäksi tulokset toimivat hyvänä vertailukohtana tulevaisuudessa suoritettaville sähköverkon laatumittauksille.



## LÄHTEET

- [1] Haaparanta Marko, insinööri Apetit Pakaste Oy, keskustelu 3.3.2010
- [2] Abb Oy, *Abb:n TTT-käsikirja, Sähkön laatu*, [www-dokumentti]. saatavilla: [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/\\$FILE/040\\_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/$FILE/040_0007.pdf). (luettu: 23.3.2010)
- [3] Fortum, *Sähkön laatu*, [www-dokumentti]. saatavilla: <http://www.fortum.fi/document.asp?path=14020;14028;31772;31773;31782;31795;31900;32214>. (luettu: 24.3.2010)
- [4] Honkapuro, S., Järventausta, P., Kivikko, K., Lassila, J., Mäkinen, A., Nikander, A., Partanen, J., Viljanen, S., *Sähkön laatu jakeluverkkotoiminnan arvioinnissa*, Tampereen ja Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, [www-dokumentti]. saatavilla: [http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/research/electricitymarkets/research/networkbusiness/Documents/SÄHKÖN%20LAATU.pdf](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricitymarkets/research/networkbusiness/Documents/SÄHKÖN%20LAATU.pdf). (luettu: 5.4.2010)
- [5] Suomen standardisoimisliitto SFS ry, *SFS-EN 50160. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2000 (luettu: 23.4.2010)
- [6] Leonardo Power Quality Initiative, *Voltage disturbances, Standard EN50160 – Voltage Characteristics in Public Distribution Systems*, [www-dokumentti]. saatavilla: <http://www.leonardo-energy.org/repository/Library/PQGuide/5.Voltage%20Disturbances/5.4.2%20Standard%20EN50160.pdf>. (luettu: 23.4.2010)
- [7] Vattenfall, *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*, [www-dokumentti]. saatavilla: [http://www.vattenfall.fi/fi/file/sahkon-laatustandardi\\_10348365.pdf](http://www.vattenfall.fi/fi/file/sahkon-laatustandardi_10348365.pdf). (luettu: 24.4.2010)
- [8] University of Wollongong, *Technical note No. 6, Voltage unbalance*, [www-dokumentti]. saatavilla: <http://www.elec.uow.edu.au/iepqrc/files/technote6.pdf>. (luettu: 30.4.2010)
- [9] Amos, R. S. ja Amos, W. S., *Newnes Dictionary of electronics 4<sup>th</sup> edition* Great Britain: Newnes, 1999, 83 s. (luettu: 30.4.2010)

## Voltage Characteristics of Public Distribution Systems

EN 50160 as principally informative and accept no responsibility when the limits are exceeded.

On the other hand, the consumer's point of view is usually totally different – they regard the limits given in EN 50160 as requirements that must be guaranteed by the supplier. However, as mentioned before, for many consumers, even fulfilling the requirements given in EN 50160 does not assure a satisfactory level of PQ. In such cases the level of PQ required must be defined in a separate agreement between supplier and consumer.

Odd harmonics				Even harmonics	
Not multiples of 3		Multiples of 3			
Order $h$	Relative voltage (%)	Order $h$	Relative voltage (%)	Order $h$	Relative voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6 .... 24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Table 2 - Values of individual harmonic voltages at the supply terminals for orders up to 25, given in percent of  $U_n$

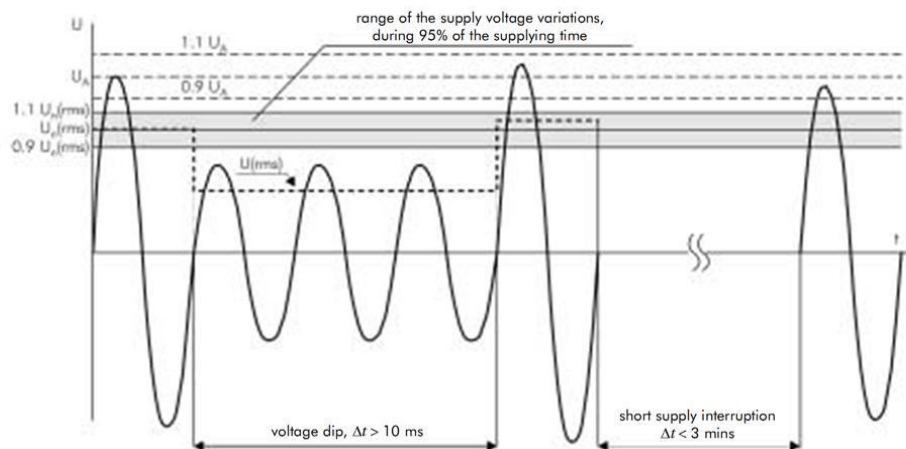
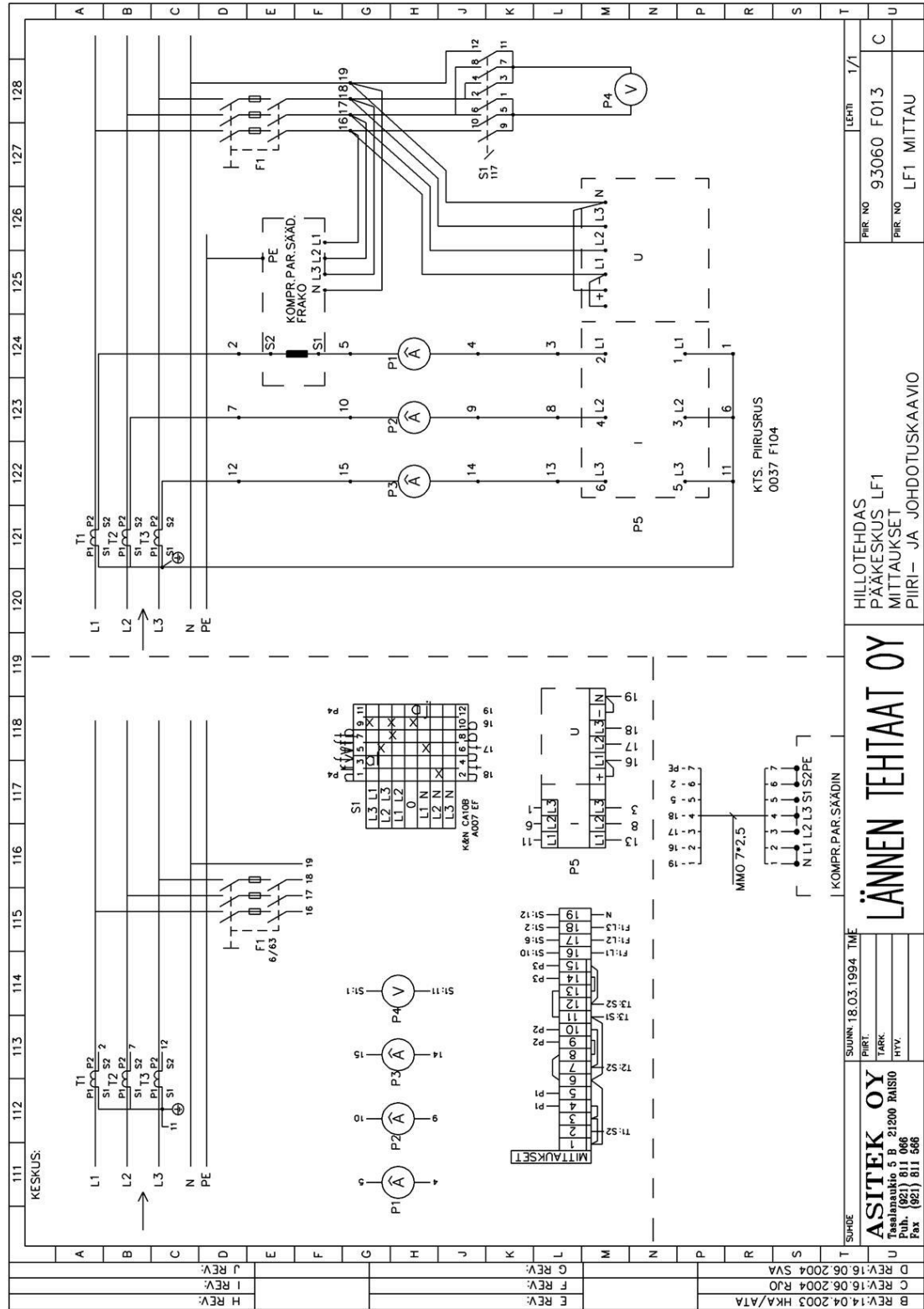
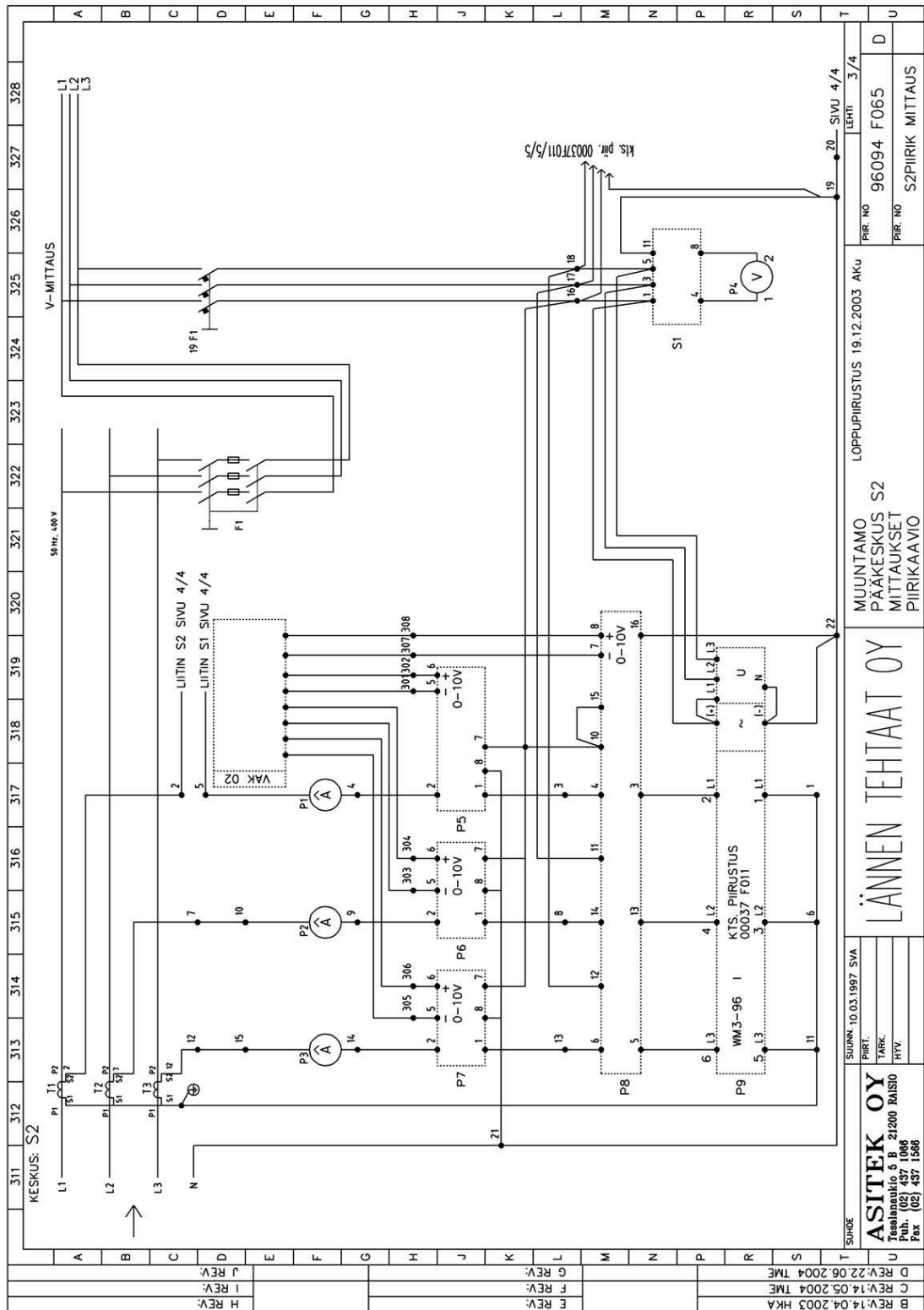


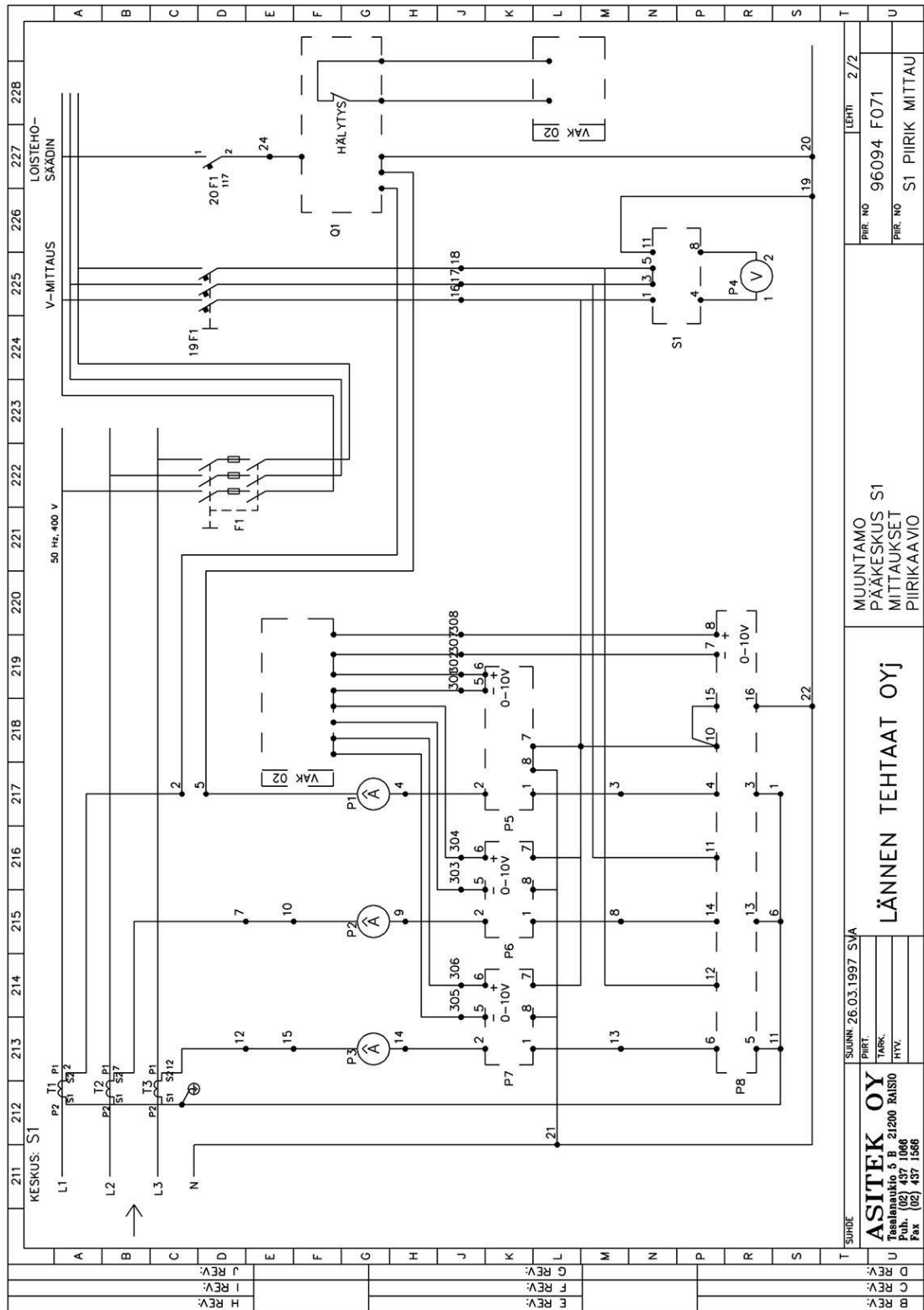
Figure 1 - Illustration of a voltage dip and a short supply interruption, classified according to EN 50160;  $U_n$  – nominal voltage of the supply system (rms),  $U_A$  – amplitude of the supply voltage,  $U(rms)$  – the actual rms value of the supply voltage

### Operation of equipment and requirements of EN 50160

The correct operation of electrical equipment requires a supply voltage that is as close as possible to the rated voltage. Even relatively small deviations from the rated value can cause sub-optimal operation of equipment, e.g. operation at reduced efficiency, or higher power consumption with additional losses and shorter service life. Sometimes prolonged deviations can cause operation of protection devices, resulting







PKVKEIKK01	U(L1)	U(L2)	U(L3)	I(L1)	I(L2)	I(L3)	Pst(L1)	Pst(L2)	Pst(L3)	f	Du(L1)	Du(L2)	Du(L3)	U2/U1	U0/U1
24.3.2010 0:00	234,7468	234,7569	234,5669	243,1926	227,746	228,3732	0,46	0,46	0,45	50,05	0,672	0,476	0,343	499593,63	443,073
24.3.2010 0:10	235,1623	235,1618	234,9567	239,7068	228,4916	227,8088	0,57	0,56	0,59	50	0,703	0,392	0,408	519096,84	533,749
24.3.2010 0:20	235,4617	235,4629	235,2626	252,065	239,6841	242,9074	0,53	0,55	0,53	50,02	0,735	0,47	0,418	433983,34	431,972
24.3.2010 0:30	235,8448	235,8607	235,8055	165,0561	155,0726	155,5164	0,59	0,61	0,62	50,04	0,678	0,384	0,355	391351,03	344,597
24.3.2010 0:40	235,9613	236,1262	235,8378	198,8279	187,684	196,7573	0,62	0,63	0,62	50,08	0,666	0,311	0,367	394182,94	420,382
24.3.2010 0:50	235,5986	235,9164	235,505	211,0905	201,3852	211,5203	0,56	0,54	0,56	50,05	0,638	0,287	0,335	322881,41	395,339
24.3.2010 1:00	235,377	235,622	235,2239	209,4728	197,2525	208,6229	0,53	0,53	0,53	50,04	0,616	0,263	0,353	301744,16	376,396
24.3.2010 1:10	235,9139	236,1546	235,9535	169,7748	153,5381	158,5664	0,58	0,57	0,57	50,02	0,781	0,414	0,487	377872,41	490,905
24.3.2010 1:20	235,9876	236,1573	235,8849	193,4667	172,6051	181,9853	0,63	0,64	0,67	50,02	0,929	0,672	0,6	490397,06	561,607
24.3.2010 1:30	235,5912	235,8092	235,4877	207,577	189,4003	198,421	0,58	0,57	0,6	50,04	0,699	0,393	0,421	397541	467,676
24.3.2010 1:40	235,7915	235,9933	235,6687	199,0482	186,8279	194,5187	0,6	0,6	0,61	50,01	0,749	0,357	0,458	488322,84	611,942
24.3.2010 1:50	235,5782	235,7528	235,4471	214,5647	203,4347	215,466	0,43	0,41	0,42	50,01	0,704	0,347	0,401	461739,97	608,469
24.3.2010 2:00	235,7171	235,9275	235,643	173,1024	167,8192	174,1253	0,52	0,51	0,54	50	0,762	0,36	0,479	503090,13	653,681
24.3.2010 2:10	235,4331	235,7216	235,3996	183,1627	173,1684	181,7242	0,56	0,56	0,59	49,94	0,872	0,438	0,586	473826,47	693,525
24.3.2010 2:20	235,4436	235,7157	235,3347	214,7934	201,7571	213,3796	0,48	0,47	0,49	49,95	0,823	0,346	0,563	383085,72	567,356
24.3.2010 2:30	235,5739	235,8152	235,4499	208,8141	198,0171	207,194	0,4	0,4	0,41	49,96	0,801	0,302	0,561	497554,91	697,668
24.3.2010 2:40	235,8002	236,0146	235,6894	199,2721	188,1325	196,9012	0,41	0,4	0,4	49,97	0,846	0,394	0,582	496997,94	685,148
24.3.2010 2:50	235,9748	236,1485	235,828	205,2468	195,4086	205,0521	0,7	0,72	0,73	49,97	1,041	0,697	0,818	484235,25	659,238
24.3.2010 3:00	235,9827	236,1642	235,8947	172,3987	162,2982	170,8143	0,56	0,56	0,58	49,98	0,882	0,456	0,63	471066,03	627,818
24.3.2010 3:10	235,6163	235,804	235,5208	211,2186	192,1378	198,6079	0,46	0,44	0,45	49,95	0,824	0,392	0,551	545753,31	682,216
24.3.2010 3:20	235,5559	235,7686	235,3782	216,0121	197,5626	206,7745	0,5	0,48	0,49	49,95	0,893	0,438	0,63	418972,78	565,807
24.3.2010 3:30	236,0136	236,1537	235,9624	172,1227	161,6071	164,7468	0,61	0,63	0,65	49,94	0,985	0,528	0,756	403600,63	521,601
24.3.2010 3:40	236,4427	236,6068	236,4037	146,8582	138,2515	141,0311	0,68	0,67	0,69	49,94	0,995	0,602	0,751	341487,81	449,945
24.3.2010 3:50	236,1484	236,3422	235,9421	182,0719	172,6679	180,634	0,5	0,51	0,53	49,93	0,855	0,466	0,605	447730	675,759
24.3.2010 4:00	236,4722	236,5407	236,2023	179,0844	178,7594	178,2628	0,42	0,41	0,43	49,94	0,759	0,357	0,561	346704,09	444,007
24.3.2010 4:10	236,3123	236,1978	236,0082	144,0231	143,2462	148,4239	0,44	0,44	0,44	49,95	0,82	0,405	0,588	171312,02	212,428
24.3.2010 4:20	235,7781	235,5971	235,448	149,0778	146,6758	152,0211	0,59	0,57	0,59	49,94	0,845	0,444	0,58	136965,44	170,028
24.3.2010 4:30	235,4949	235,4526	235,1929	175,9843	176,3413	182,7537	0,61	0,63	0,64	49,95	0,932	0,614	0,735	218587,59	280,287
24.3.2010 4:40	235,3859	235,3212	235,0192	157,9847	158,3012	166,1947	0,46	0,46	0,45	49,96	0,806	0,447	0,583	255638,16	304,882
24.3.2010 4:50	235,103	234,9636	234,7057	152,452	154,8773	158,9742	0,56	0,57	0,6	49,92	0,781	0,442	0,541	200225,56	247,885
24.3.2010 5:00	234,4411	234,4185	234,1101	166,277	163,5069	168,6595	0,51	0,52	0,51	49,93	0,755	0,395	0,513	298592,31	374,863
24.3.2010 5:10	234,5775	234,6151	234,3128	161,0304	159,7443	168,0558	0,77	0,77	0,77	49,98	1,207	1,043	0,98	365375,47	464,134
24.3.2010 5:20	234,1629	234,3085	233,7766	178,4253	172,9881	185,4838	0,62	0,62	0,61	50	1,161	1,047	0,979	277339,41	366,734
24.3.2010 5:30	233,6292	233,69	233,238	179,6063	172,8687	182,4732	0,46	0,46	0,45	49,99	1,141	1,062	1,044	157470,66	224,634
24.3.2010 5:40	232,8192	232,9251	232,5278	200,2302	188,7845	202,6431	0,69	0,66	0,69	49,97	1,296	1,161	1,149	196161,58	317,859
24.3.2010 5:50	231,9961	232,2261	231,812	242,8989	230,6461	242,9819	0,72	0,71	0,73	50	1,238	1,191	1,056	351662,56	532,54
24.3.2010 6:00	231,9306	232,2367	231,5988	294,5675	276,3045	291,8011	0,5	0,5	0,5	50,01	1,34	1,305	1,089	199511,38	299,565
24.3.2010 6:10	231,5523	231,8664	231,5167	291,8011	258,5063	281,3542	0,72	0,7	0,7	50,04	1,097	1,101	0,899	316651,88	477,064